АТАНАС
ШИШКОВ

ПЕРВЫЕ ШАГИ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

К. т. н. инж. АТАНАС И. ШИШКОВ

ПЕРВЫЕ ШАГИ В РАДИО-ЭЛЕКТРОНИКЕ

Перевод с болгарского инж. Ларисы И. Коновой

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО „ТЕХНИКА"
София, 1986

УДК 621 . 396 . 6 (023)

Книга представляет собой систематическое изложение основ радиоэлектроники, предназначенное для юных читателей. Ею могут, однако, пользоваться все те, кто делает „первые шаги" в этой интересной области. В книге на доступном языке с помощью оригинальных рисунков рассматриваются основные вопросы радиоэлектроники и даются указания, как самому сделать некоторые радиолюбительские приборы. Книгу можно использовать в качестве пособия в кружках по радиоэлектронике, а также для самообразования.

621 . 396 (023)



Краткая история радиоэлектроники

1.1. Радиолюбитель спасает экспедицию Нобиле

23 мая 1928 г. дирижабль „Италия“ под командованием генерала Умберто Нобиле, перелетев Европу, направился от острова Шпицберген к Северному полюсу. На борту дирижабля находилась полярная экспедиция, состоящая из 16 человек. На следующий день дирижабль достиг Северного полюса, но разразившаяся буря принудила его без посадки лечь на обратный курс. На обратном пути находившийся на борту телеграфист сообщил, что буря переходит в ураган, после чего радиосвязь внезапно прервалась. За полетом экспедиции следили с большим интересом все люди, и поэтому печальная весть сразу же облетела все пять континентов. Все ожидали с замиранием сердца возвращения дирижабля. Прошло три дня в напряжении и догадках. Стало ясно, что произошла катастрофа, в газетах появились различные предположения о гибели экипажа. Неизвестность тревожила всех честных людей.

Вдруг 3 июня из деревни Вохма, Архангельской области, прилетела телеграмма в Москву. Какой-то советский радиолюбитель сообщал с далекого Севера, что принял сигналы о помощи экспедиции Нобиле. Это был молодой коротковолновик Николай Шмидт. Киномеханик по профессии, он увлекся радиолюбительством, выучил азбуку Морзе и сам собрал радиоприемник. Третьего июня вечером он прослушивал тридцатиметровый диапазон на своем одноламповом регенеративном приемнике, собранном на тетроде. Он принял обрывки какой-то передачи, однако ему удалось расслышать слова... *Италия, Нобиле, SOS, SOS...*

Николай ничего не знал о катастрофе дирижабля, но сигналы бедствия подсказали ему, что кто-то находится в критическом положении и нуждается в помощи. Поэтому он отправил в Москву телеграмму.

Как только мир узнал новость, шесть государств начали лихорадочную подготовку к спасению членов экспедиции. Советская спасательная группа была самой большой и состояла из нескольких кораблей во главе с прославленным ледоколом „Красин“, который имел на борту трехмоторный самолет. Весь мир с напряжением следил за спасательным походом смелых советских моряков. Двенадцатого июля экспедиция Нобиле была открыта на льдине и принята на борт ледокола „Красин“... Первая благодарственная телеграмма, которую отправили спасенные полярники, была адресована советскому радиолюбителю Николаю Шмидту...

1.2. Передача сообщений на расстояния

Мечта человека передавать сообщения на большие расстояния возникла очень давно. Согласно древнегреческой легенде известие о том, что полководец Мильтиад одержал победу над персами, была доставлена греческим воином, который пробежал без остановки 42 км 195 м из города Марафона до Афин. Он из последних сил прибежал в столицу, сообщил о победе и умер.

В средние века для передачи сообщений использовали деревянные башни, построенные на подходящих высотах. Башни имели подвижные жерди и доски, взаимное расположение которых символизировало различные буквы. В 1793 г. такое сооружение было построено между городами Париж и Лилль, где на расстоянии 220 км

были расположены 23 станции. Одну букву передавали от одного до другого города в среднем за 2 минуты, а одно предложение — за 1—2 часа.

1.3. Изобретение телеграфа

Большой шаг вперед в технике связи сделал талантливый русский ученый **Павел Львович Шиллинг**, который в 1832 г. изобрел первый электромагнитный телеграф. Пять лет спустя **Самюэль Морзе** сконструировал широкоизвестный электромагнитный самопишущий аппарат, который в усовершенствованном виде используется до сих пор.

Телеграф быстро проник во многие страны, а в 1858 г. через Атлантический океан был проложен первый кабель, связывающий Европу с Америкой. В начале нашего века телеграфная техника достигла расцвета. Были построены тысячи километров проводных и кабельных линий. Всего за несколько часов новости облетали весь мир.

Проводная телеграфная связь была прекрасным приобретением, но ее нельзя было использовать в движущихся объектах. Так, например, корабли дальнего плавания были оторваны от мира, и судьба их была неизвестна.

1.4. Электромагнитные волны

Опыты знаменитого английского физика **Майкла Фарадея** (1791—1867) очень расширили знания об электричестве и магнетизме. На основании этих опытов его замечательный соотечественник **Джеймс Максвелл** (1831—1879) написал в 1873 г. научный труд, в котором впервые были опубликованы знаменитые четыре *уравнения Максвелла*. Таким образом, используя математику, он сумел чисто теоретическим путем предсказать, что с помощью электрического тока могут быть получены *электромагнитные волны*. (Радиоволны — это не что иное, как электромагнитные волны). До того никто не предполагал, что электрический ток может образовать электромагнитные волны. Даже и самому Максвеллу практически не удалось получить их. Лишь в 1888 г. этого добился немецкий физик **Генрих Герц** (1857—1894). Однако проводя свои опыты, Герц и не подозревал, что полученные им электромагнитные волны могут быть использованы для радиосвязи.

1.5. Изобретатель радио А. С. Попов

Знаменитый русский физик **Александр Степанович Попов** (1859—1906) — первый ученый, который понял, что электромагнитные волны могут быть использованы как средство для беспроводной связи и поэтому по праву считается изобретателем радио.

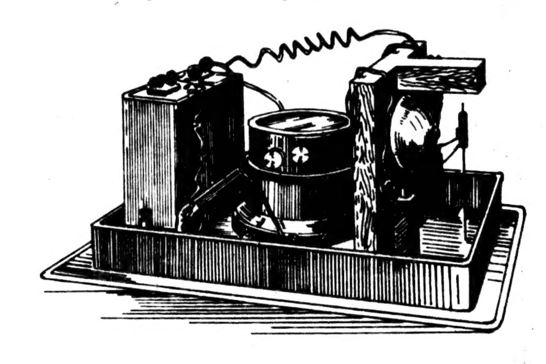


Рис. 1.1. Первый радиоприемник

А. С. Попов родился 16 марта 1859 г. в поселке Турьинские рудники Пермской губернии (сейчас город Краснотурьинск). После окончания физико-математического факультета в г. Петербурге он остался работать в Университете, потом преподавал в Военно-морском училище. Там Попов провел большую научно-исследовательскую работу в области электричества. В результате он сконструировал устройство, *которое реагировало на электромагнитные волны, появляющие-*

ся во время грозы (каждая молния излучает мощные электромагнитные волны). Это устройство представляло собой *первый в мире радиоприемник* (рис. 1.1). 7 мая 1895 г. А. С. Попов продемонстрировал свое изобретение перед Русским физико-химическим обществом в Петербурге и выступил с докладом об его устройстве и действии. Этот день вошел в историю как день рождения радио.

1.6. Развитие радиотехники

После открытия А. С. Попова ученые направили свои усилия на усовершенствование радиоприемников и передающих устройств, т. к. поняли, что беспроволочная радиосвязь имеет большие перспективы. В 1903 г. **Флеминг** изобрел *ламповый диод*, а в 1907 г. **Ли де Форест** сконструировал *триодную лампу*. Это было началом нового этапа в развитии радиотехники, поскольку *электронные лампы могли усиливать слабые электрические сигналы*. В 1913 г. **Мейснер** сконструировал первый *автогенератор*, с помощью которого можно было получить *незатухающие электрические колебания*, а это было очень важно для передающей техники. В результате этих открытий в период 1920—1925 гг. началось производство различных видов ламповых радиоприемников и строительство ряда радиопередатчиков. Так возникла и оформилась наука *радиотехника*, главной задачей которой являлась передача информации (речи, музыки и сообщений) на большие расстояния беспроволочным способом.

Радиотехника быстро развивалась, в результате чего в 1930—1935 гг. были разработаны ряд новых радиоламп: *пентоды, комбинированные лампы, газотроны, тиратроны* и т. д. Это дало возможность, с одной стороны, конструировать радиоаппаратуру и устройства завидного качества, а с другой, радиотехника и ее приложения начали проникать в промышленность, приборостроение, измерительную технику и т. д.

В конце второй мировой войны в связи с улучшением качества радиолокаторов был сконструирован первый *точечный диод*. Таким образом, полупроводники вошли в радиотехнику, а поворотным моментом стало открытие в 1948 г. *транзистора* (изобретатели: Бардин, Братейн и Шокли), что послужило началом *полупроводниковой электроники*. По своим основным качествам (малый объем, долговечность, отсутствие накала, механическая прочность, экономичность, питание от источников низкого напряжения и пр.) транзистор оказался серьезным конкурентом радиоламп.

В результате с 1955 г. началась быстрая *транзисторизация радиоэлектронной аппаратуры*, и в настоящее время электронные лампы находят применение только в передатчиках, в некоторых промышленных устройствах и в специальной радиоизмерительной аппаратуре.

Особенно перспективным оказалось внедрение транзисторов в электронно-вычислительные машины, которые до того времени состояли из большого количества радиоламп (примерно 50 000) и занимали 2—3 комнаты. Это положило начало *полупроводниковой микроэлектроники*, которую с полным правом можно назвать одним из чудес человеческого гения. Так возникли *интегральные схемы*, в которых кристалл размерами примерно 4 × 4 миллиметра содержит 10 000 транзисторов! Применяя их, разработчики радиоаппаратуры достигают почти фантастической микроминиатюризации электронной аппаратуры. Вот почему радиоэлектроника занимает ведущее место в современной научно-технической революции и прогрессе всего человечества.

1.7. Возникновение радиолюбительского движения

Возможность передачи речи и музыки на большие расстояния при помощи радиоволн представляло в свое время настоящее чудо. Сегодня мы уже привыкли к радиоприемнику и телевизору, но люди старшего поколения с умилением вспоминают тот период 1925—1930 гг., когда они с трепетом надевали наушники, ожидая услышать далекую речь или музыку (первые радиоприемники были с наушниками).

После первой мировой войны „чудо радиоволн“ заинтриговало многих и они начали изучать „тайны“ этого изобретения, а некоторые и сами начали собирать радиоприемники и передатчики. Так возникло радиолюбительское движение, которое объединяет в своих рядах людей различных профессий и возрастов.

Вначале на радиолюбителей не обращали особого внимания и, чтобы они „не мешали“ служебной радиосвязи, им был предоставлен коротковолновый диапазон (в то время считали длинные волны самыми перспективными). Но вдруг в конце 1923 г. двое радиолюбителей установили радиосвязь между Англией и Америкой на коротких волнах, притом с помощью маломощных передатчиков. Это открытие *вызвало переворот*, и специалистам пришлось изменить свое отношение не только к коротким волнам, но и к радиолюбителям. Об этом свидетельствуют официальные обращения ряда правительств к радиолюбителям всего мира о совместных исследованиях при овладении дальней радиосвязью на коротких волнах. И результаты не заставили себя ждать — уже год спустя радиолюбители, используя маломощные передатчики, установили связь на коротких волнах между Англией и Новой Зеландией. Таким образом было доказано, что можно установить радиосвязь между любыми двумя точками земного шара. Это повысило авторитет радиолюбительского движения и привело к международному соглашению, согласно которому *определенные коротковолновые диапазоны предоставлялись радиолюбителям.*

В настоящее время радиолюбительское движение не только „хобби“, но и *массовая школа самостоятельного повышения квалификации* в области приемной и передающей техники, телемеханики, радиоуправления, телевидения, электроакустики и т. д. Это подтверждает тот факт, что с радиолюбительства начали свою деятельность многие известные ученые, среди которых советские академики Минц, Берг, Введенский, Сифоров и др. Радиолюбителем был и остался им до конца жизни Эрнст Кренкель — радист прославленной в 1937—1938 гг. полярной экспедиции советского ученого Папанина. О большом значении радиолюбительского движения говорит тот факт, что во время второй мировой войны тысячи радиолюбителей вступили в ряды Советской Армии и внесли свой вклад в победу, а более 300 из них были удостоены звания Героя Советского Союза.

В Болгарии радиолюбительское движение зарождается с появлением первых заграничных радиоприемников. Среди „загоревшихся“ радиолюбительством в то время были проф. Асен Златаров [1], Элин Пелин [2] и др. В 1926 г. был основан первый радиоклуб, задачей которого была преимущественно просветительная деятельность, а 9 лет спустя начал выходить первый радиолюбительский журнал.

После 9.IX.1944 г. радиолюбительское движение в Болгарии становится организованным. Создается ряд областных, городских и районных радиоклубов, в которых тысячи юношей и девушек под руководством опытных специалистов овладевают радиотехникой и повышают свою квалификацию.

[1] Видный болгарский ученый-химик прогрессивных взглядов (1885—1936).

[2] Видный болгарский писатель (1887—1949).

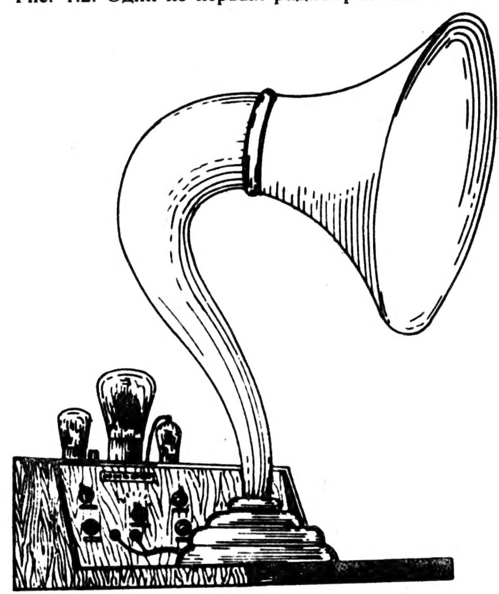
По неофициальным данным сейчас в стране имеется более 30 000 радиолюбителей, из которых более 500 имеют личные радиостанции.

На большую заботу государства о радиолюбительстве в Болгарии радиолюбители отвечают конкретными делами. Об этом свидетельствуют не только двухсторонние радиолюбительские связи, количество которых ежегодно превышает 1 000 000, но и большое количество экспонатов, представляемых ежегодно на выставках ТНТМ. Это недвусмысленно доказывает, что радиолюбители находятся в первых рядах носителей технического прогресса в Болгарии и, таким образом, претворяют в жизнь лозунг партии — „Болгарская нация — нация техническая, нация коммунистическая!".

1.8. Развитие радиотехники в Болгарии

Развитие радиотехники в Болгарии начинается в 1923—1925 гг. с появлением первых заграничных радиоприемников (рис. 1.2.). Они принимали только иностранные радиостанции, т. к. в то время в Болгарии не было радиопередатчиков гражданского назначения. Статистика показывает, что в 1927 г. в стране было всего 427 радиоприемников.

Рис. 1.2. Один из первых радиоприемников



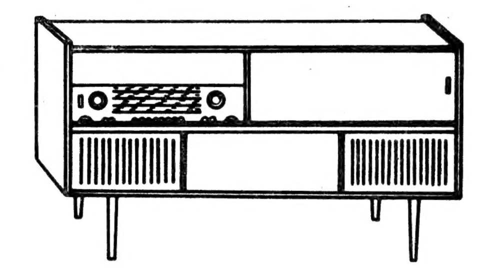


Рис. 1.3. Радиокомбайн

Рис. 1.4. Современный телевизор

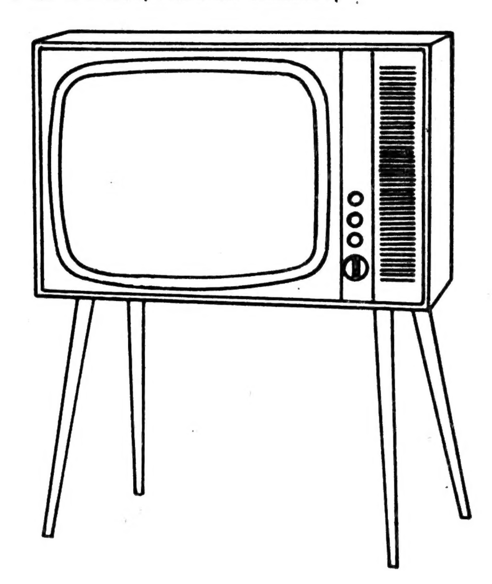
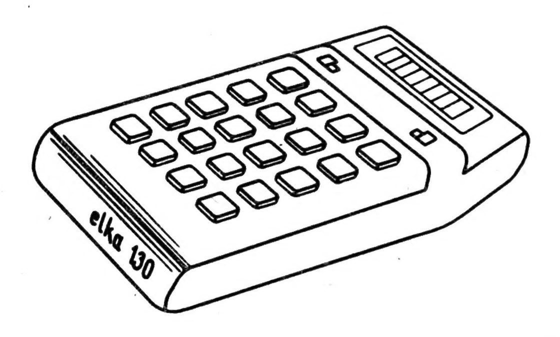


Рис. 1.5. Карманный калькулятор



В 1929 г. группа радиолюбителей построила первый радиопередатчик мощностью 50 ватт, а через два года мощность его была увеличена до 500 ватт. В 1935 г. радиовещание становится монополией государства. Через два года был построен передатчик Радио-София около села Вакарел. В то время в стране не было радиопромышленности, радиоприемники и радиодетали ввозили из-за границы.

После 9.IX.1944 г. начался бурный расцвет Болгарии. В стране открываются как средние, так и высшие технические учебные заведения по радиотехническим специальностям. Одновременно закладываются основы отечественной радиопромышленности, начинается строительство первых заводов и предприятий, производящих радиоаппаратуру. В 1959 г. вступил в эксплуатацию Софийский телевизионный передатчик, после чего началось строительство целой сети ретрансляторов и передатчиков, чтобы телевизионную программу могла принимать вся страна.

Сегодня Болгария — страна с хорошо развитой радиоэлектронной промышленностью. В 1980 г. в стране насчитывалось около 2 000 000 телевизоров и 2 500 000 радиоприемников, большая часть которых произведена отечественной промышленностью. Сейчас в Болгарии производятся радиоприемники (рис. 1.3,), телевизоры (рис. 1.4), радиопередатчики, радиолокаторы, электронно-счетные машины (рис. 1.5), магнитофоны, полупроводниковые приборы, громкоговорители и т. д.

1.9. Что значит слово „радиоэлектроника"

Два-три десятилетия назад радиотехника охватывала, главным образом, радиопередающую и радиоприемную технику. Сегодня слово „радиотехника" уже заменено *более широким понятием „радиоэлектроника", которое включает в себя не только радиотехнику, но и ряд новых областей знания*, таких как полупроводниковая электроника, импульсная техника, электронно-вычислительная техника, электронная автоматика, телевидение и т. д. Отсюда видно, что если сначала радиотехника была связана с передачей информации беспроводным способом, то сейчас радиоэлектроника глубоко вошла почти во все области человеческого знания. Без радиоэлектроники немыслимы не только радиоприемники, телевизоры и магнитофоны, но и электронно-вычислительные машины, космические корабли и ракеты, кибернетические устройства и автоматы, точнейшие измерительные приборы и аппараты, сверхзвуковые самолеты, электронные микроскопы и т. д.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Изобретатель радио — русский ученый А. С. Попов. День рождения радио 7 мая 1895 г. День 7 мая определен как Международный день радио.**
2. **Вначале радиотехника охватывала, главным образом, приемную и передающую технику. Однако с возникновением новых областей знания в настоящее время используется слово радиоэлектроника, более емкое и всеобъемлющее.**
3. **До 9.IX.1944 г. в Болгарии не было радиоэлектронной промышленности и все радиоприемники и радиодетали ввозились из-за границы. Сегодня Болгария — страна с хорошо развитой радиоэлектронной промышленностью. Она производит различные виды радиоэлектронной аппаратуры, которые вывозит во многие страны мира.**

2 Основные сведения об электричестве

2.1. Электротехника — основа радиоэлектроники

Каждый знает, что радиоприемники, телевизоры, магнитофоны и прочие радиоэлектронные устройства работают на электрическом токе. Но в то время как в обычных машинах есть движущиеся части и все явления наглядны, в радиоэлектронике все как будто мертво и неподвижно. В действительности этот покой обманчив, потому что каждый проводок и каждая деталь густо „населены" невидимыми глазу электронами, совершающими невообразимо сложные движения.

Электрический ток зарождается в микрофоне, протекает через антенну, образует радиоволны, усиливается транзисторами, раскачивает громкоговоритель, рисует картины на экране телевизора и т. д.

Поэтому *овладение электроникой немыслимо без знания свойств электрического тока и его законов*.

2.2. Электризация тел

Еще в древности было известно свойство янтаря (окаменевшей смолы иглолистных растений) притягивать легкие предметы, если его натереть шерстью или кожей (рис. 2.1). Поскольку греческое название янтаря — электрон, отсюда и возникло название „электричество". Электризация предметов оставалась неизученной до конца XVI века, когда было открыто, что и другие вещества, например, стекло, сера, смола, сургуч и пр. обладают подобными свойствами. Опыты показали, что *при электризации тел всегда получается два вида электричества*.

Электрический заряд, возникающий на стеклянной палочке был назван **положительным**, а электрический заряд, возникающий на эбонитовой **палочке — отрицательным.** Так возникли и обозначения плюс (+) и минус (+).

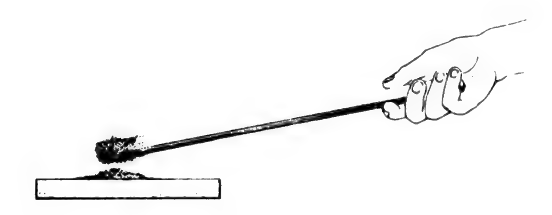


Рис. 2.1. Наэлектризованная стеклянная палочка притягивает легкие тела

А какие изменения происходят в стекле и эбоните при трении? Чем объясняется электризация?

2.3. Объяснение явления электризации

Все предметы и вещества состоят из малых частиц, называемых **атомами.** В твердых веществах атомы крепко связаны между собой, а в жидких и газообразных эти связи незначительны. Чтобы понять как малы атомы, представим себе, что в одной капле воды атомов больше, чем водяных капель в Черном море!

Каждый атом состоит из **положительного ядра,** вокруг которого обращаются с головокружительной быстротой отрицательно заряженные частицы, называемые электронами. На рис. 2.2 показаны атомы легкого газа гелия и железа. Таким же образом устроены атомы всех других химических элементов. В обычном состоянии число вращающихся вокруг ядра электронов равно числу положительных частиц ядра, и *атом в целом электрически нейтрален*.

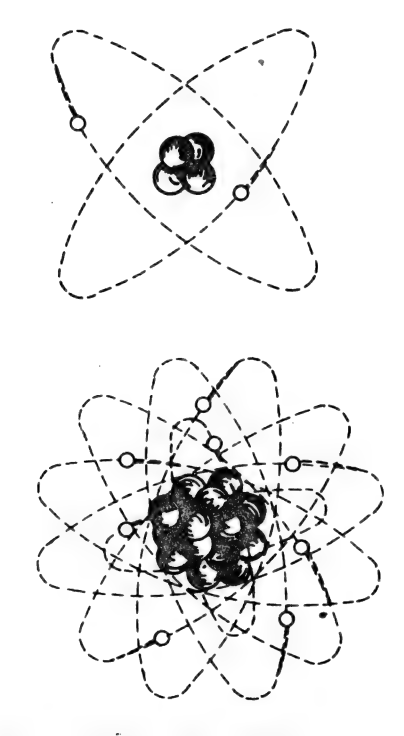


Рис. 2.2. Атомы гелия и железа



Рис. 2.3. Условное изображение элементарных частиц

Трением, нагреванием и т. д. с внешней орбиты атома можно отнять один или несколько электронов. В этом случае количество положительных зарядов в ядре будет преобладать, атом превратится в положительно заряженную частицу, **положительный ион.** Кроме потери электронов, возможно и присоединение дополнительных электронов. При этом атом превращается в отрицательно заряженную частицу и называется **отрицательным ионом.** Все это показано на рис. 2.3, где атомы представлены в упрощенном виде.

При электризации тел происходит отдача или присоединение только электронов, а положительные частицы остаются неподвижными, потому что они находятся в ядрах атомов и крепко связаны с веществом. Например, натертая лоскутом шерсти стеклянная палочка заряжается положительно, а шерсть — отрицательно, т. к. электроны переходят со стеклянной палочки на шерсть. При натирании эбонитовой палочки электроны переходят с шерсти на палочку, поэтому лоскут шерсти заряжается положительно, а эбонитовая палочка — отрицательно.

Явление присоединения или отдачи электронов от атомов называется еще **ионизацией.** Оно не имеет ничего общего с расщеплением атома, когда изменяется строение ядра.

2.4. Электрон

Без преувеличения можно сказать, что электрон является самой замечательной материальной частицей, которая создала целую эпоху в науке и технике. Познакомимся поближе со свойствами и особенностями этого „чародея“.

Электрон необычайно мал. Если принять, что он представляет собой сферу, то его диаметр в 100 000 раз меньше диаметра атома, а вес одного электрона во столько раз меньше одного грамма, во сколько раз один грамм легче земного шара.

При электризации тел *электроны переходят с одного тела на другое,* но в силу малой массы электронов видимой перемены в весе тела не наблюдается. Следует отметить, что *электроны всех веществ и химических элементов совершенно одинаковы.*

Целый ряд остроумных и изумительных по своей точности опытов, по-

ставленных физиками, дали возможность измерить не только диаметр и массу электрона, но и величину его *отрицательного электрического заряда.*

Сравнив размеры и массу электрона с его электрическим зарядом, мы сразу заметим, что *в ничтожном объеме „сконцентрирован" сравнительно большой электрический заряд.* Масса электрона исключительно мала по сравнению с теми огромными силами, которые в нем сосредоточены. В этом отношении электрон подобен маленькой птичке, обладающей мощностью самолетного мотора. Благодаря этому электрон исключительно „маневрен" — *он может двигаться с огромной скоростью и производить миллиарды колебаний в секунду.*

Сам по себе электрон — малая частица с ничтожным электрическим зарядом. Однако число участвующих в различных электрических явлениях электронов огромно, и в результате эффект может быть очень значительным.

2.5. Единица количества электричества

Радиоэлектроника — наука прикладная. Это означает, что она не только изучает явления, но и создает новые и сложные устройства. Проектирование и конструирование этих устройств связано, с одной стороны, с математикой, а с другой — с величинами, характеризующими электричество.

Мы уже знаем, что при электризации тел имеет место или отдача, или присоединение электронов. Для оценки этого явления существует понятие **количество электричества.** Единица количества электричества называется кулон в честь французского физика **Шарля Кулона** (1736—1806). Один кулон электричества равен такому огромному числу электронов:

1 кулон = 6 300 000 000 000 000 000 электронов.

Натирая стеклянную или эбонитовую палочку, наэлектризовывая ее, мы отнимаем или добавляем тысячные части кулона электричества, однако, число участвующих в этом процессе электронов огромно и насчитывает сотни и тысячи миллиардов.

2.6. Электрическое поле

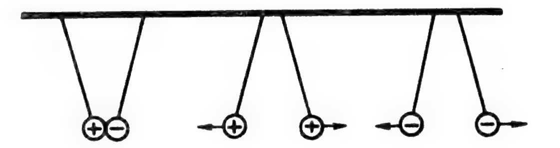
Вокруг каждого заряженного (наэлектризованного) тела существует *электрическое поле,* невидимое нашему глазу. Электрическое поле имеет такое свойство: если поместить в него другие заряженные тела, то на них начнут действовать определенные силы. Следовательно, *электрическое поле является носителем энергии.* Эта энергия не получается извне, а возникает за счет тех причин, которые наэлектризовали тело. В связи с этим вспомним основной закон природы (закон сохранения энергии): *энергия не возникает и не исчезает, она только переходит из одного вида в другой и из одного тела в другое.*

На рис. 2.4 показано, как заряженные тела взаимодействуют посредством своих электрических полей. Следует помнить, что *тела, наэлектризованные разноименными зарядами, притягиваются, одноименными — отталкиваются.*

Электрическое поле характеризуется, главным образом, двумя величинами: направлением и напряженностью.

Положительным направлением поля принято считать направление от положительного заряда к отрицательному. Для наглядности электрическое поле изображается т. н. электрическими **силовыми линиями**, которые выходят из

Рис. 2.4. Тела, наэлектризованные одноименными зарядами, отталкиваются, а наэлектризованные разноименными зарядами — притягиваются



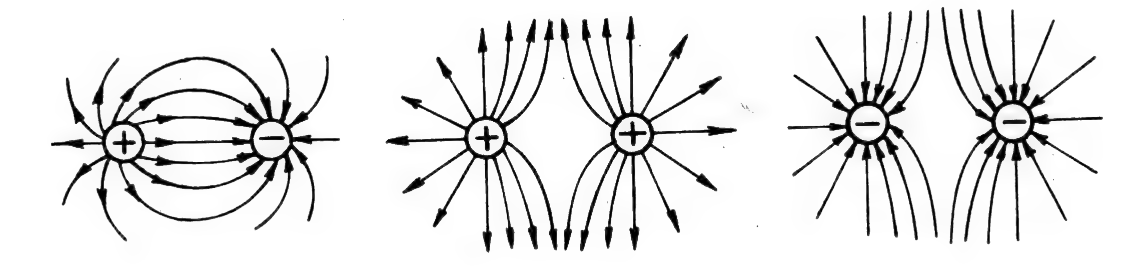


Рис. 2.5. Силовые линии электрического поля

положительно заряженного тела и входят в отрицательно заряженное. Их форма связана с силой, которая действовала бы на свободный положительный заряд, помещенный в данную точку поля. На рис. 2.5 показаны электрические поля разноименных и одноименных зарядов. Там, где силовые линии расположены более густо, напряженность поля больше.

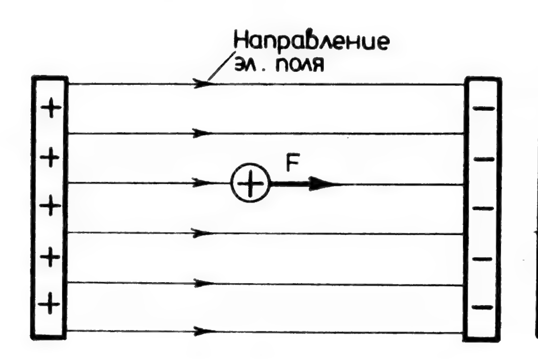


Рис. 2.6. Положительные частицы движутся в направлении поля

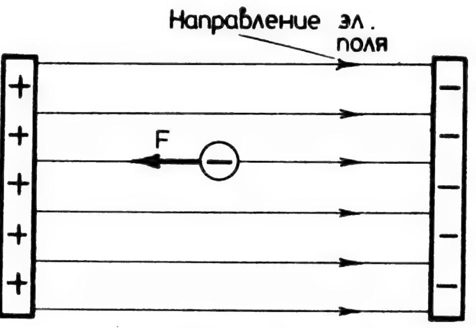


Рис. 2.7. Отрицательные частицы движутся навстречу полю

На рис. 2.6 показано электрическое поле между двумя разноименно заряженными металлическими пластинами. Положительный электрический заряд, помещенный в это поле, будет двигаться *в направлении поля*, потому что будет притягиваться отрицательной и отталкиваться положительной пластиной. А если в то же самое поле поместить электрон (рис. 2.7), то, поскольку он является отрицательно заряженной частицей, он будет отталкиваться от отрицательно заряженной пластины и притягиваться к положительно заряженной, т. е. электрон будет двигаться против направления поля.

Оба примера показывают, что поле действительно является носителем энергии, т. к. при определенных условиях оно может совершать работу по переносу электрических зарядов.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Вещество состоит из маленьких частиц, называемых атомами. В нормальном состоянии они нейтральны, т. к. количество положительных зарядов в ядре равно количеству окружающих его отрицательных электронов.**
2. **Атом, присоединивший или отдавший электроны, уже не нейтрален, он превращается соответственно в отрицательно или положительно заряженный ион.**
3. **Электризация тел связана с отдачей или присоединением электронов. Положительные заряды неподвижно связаны с ядрами атомов, т. е. с веществом.**
4. **Вокруг любого заряженного тела существует электрическое поле, которое является носителем энергии.**
5. **Свободный электрон, помещенный в электрическое поле, начинает двигаться навстречу полю. Благодаря своей малой массе и значительному электрическому заряду электрон, помещенный в соответствующее поле, может совершать миллиарды колебаний в секунду.**
6. **Единица количества электричества называется кулон.**

3 Постоянный электрический ток

3.1. Проводники и изоляторы

Вещества, в которых имеется значительное количество свободных носителей зарядов (электронов или ионов), называются **проводниками**. Хорошими проводниками являются все металлы, растворы солей, кислоты и щелочи, влажная почва и пр. Тело человека тоже проводит электрический ток, особенно, если кожа влажная.

Из металлов *лучший проводник — серебро*, за ним следует медь, золото, алюминий, цинк, железо и т. д. На практике чаще всего используют медные проводники.

Если бы в воображаемую лупу, увеличивающую в миллиарды раз, мы могли рассмотреть металлический проводник (рис. 3.1*а*), то мы заметили бы, что во внешней орбите каждого атома недостает по одному электрону, т. е. атомы представляют собой **положительные ионы**. Эти ионы, хотя и удаленные друг от друга, сильно связаны между собой междуатомными силами, что и обусловливает твердость металлов. Между положительными ионами находятся в хаотическом движении **свободные электроны**. Это хаотическое движение называется еще *термическим колебанием* и оно тем интенсивнее, чем выше температура металла. Число свободных электронов в одном кубическом сантиметре металла огромно — около 100 000 000 000 000 000 000 000!

Для сравнения можно отметить, что это число больше, чем число песчинок, содержащихся в 100 вагонах с песком.

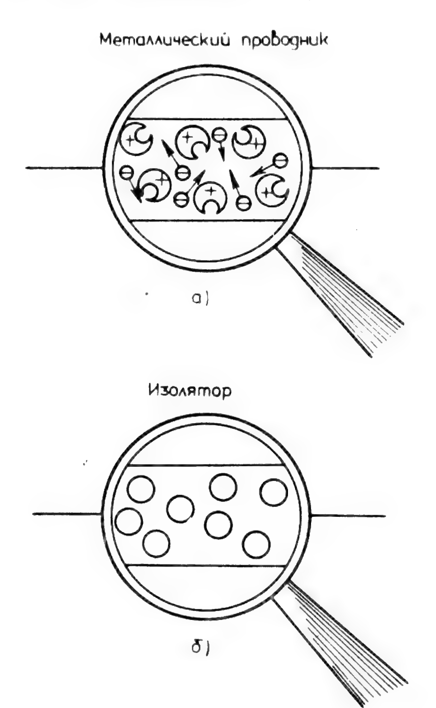
Надо отметить, что металлы в целом электрически нейтральны, потому что положительные заряды ионов компенсируются точно таким же числом отрицательных зарядов — свободных электронов.

Вещества, в которых отсутствуют свободные носители зарядов, называются **изоляторами** или **диэлектриками**. К изоляторам относятся: воздух, каучук, фарфор, пластмассы, слюда, парафин, масла, шелк, смолы, стекло, гетинакс, бакелит, дистиллированная вода и пр.

Если в нашу „волшебную лупу" мы рассмотрим одну полосочку изолятора (рис. 3.1*б*), то заметим, что здесь все электроны сильно связаны с атомами. Следовательно, *в изоляторах отсутствуют свободные носители зарядов*.

Как мы увидим далее, различные виды проводников и изоляторов яв-

Рис. 3.1. Как выглядели бы проводник и изолятор через воображаемую лупу



ляются основными материалами, которые используются в электротехнике и радиоэлектронике.

3.2. Электрический ток

Направленное движение свободных носителей зарядов называется электрическим током. В металлах электрический ток возникает за счет направленного движения только одного вида носителей зарядов — электронов. На рис. 3.2*а* условно показан металлический проводник, по которому не протекает ток. Видно, что его свободные электроны *движутся хаотично в различных направлениях вследствие теплового колебания. Когда по проводнику протекает ток, его свободные электроны движутся в определенном направлении (рис. 3.2б).* Но откуда появляется электрический ток в проводниках?

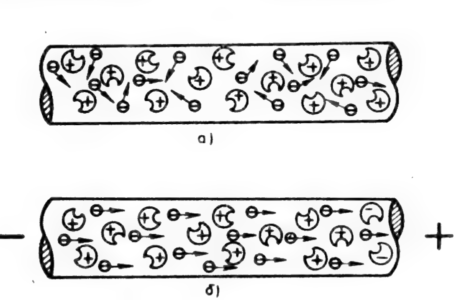


Рис. 3.2. Структура проводника: *а*) при отсутствии электрического поля; *б*) при наличии поля

Каждому из нас известна плоская батарейка для карманного фонарика. Она представляет собой **источник электрического тока**. На отрицательном полюсе батареи имеется избыток электронов, а на положительном — недостаток. Следовательно, между ее полюсами существует электрическое поле. На рис. 3.3*а* батарейка соединена проводником с лампочкой. Если замкнуть цепь ключом, то *электрическое поле, созданное батарейкой, будет распространяться по проводнику с огромной скоростью*. Оно действует почти одновременно на все свободные электроны, которые, в свою очередь, приходят в направленное движение, т. е. протекает **электрический ток**. Для возникновения электрического тока необходимо, чтобы *цепь была замкнута*. В разомкнутой цепи электрический ток протекать не может.

Следует отметить, что в замкнутой цепи электрическое поле действует и на положительные ионы металла, но они крепко связаны с веществом и остаются неподвижными.

3.3. Источники электрического тока

Источниками электрического тока являются **батареи, аккумуляторы, динамомашины**, различные виды **генераторов** и т. д. Они производят электроэнергию за счет какого-нибудь другого вида энергии, например, химической, механической, тепловой и пр. Следовательно, и в случаях с источниками электрического тока закон сохранения энергии остается в силе.

Каждый источник тока имеет свойство при замыкании цепи создавать в проводниках электрическое поле, которое с определенной силой действует на свободные электроны. Поэтому говорят, что каждый источник тока имеет определенную электродвижущую силу (ЭДС).

Источники электрического тока электронов не производят, но созданное ими электрическое поле приводит в движение свободные электроны, находящиеся в самих проводниках. В этом отношении любой источник тока можно сравнить с насосом, который приводит в движение воду в замкнутой системе труб (рис. 3.3*б*). Насос передает энергию турбине так же, как батарейка передает энергию лампочке. Очевидно, в любой неразветвленной системе количество воды, протекающей в толстых и тонких трубах за единицу времени, одно и то же, только по тонким трубам частицы воды движутся с бóльшей скоростью. По аналогии

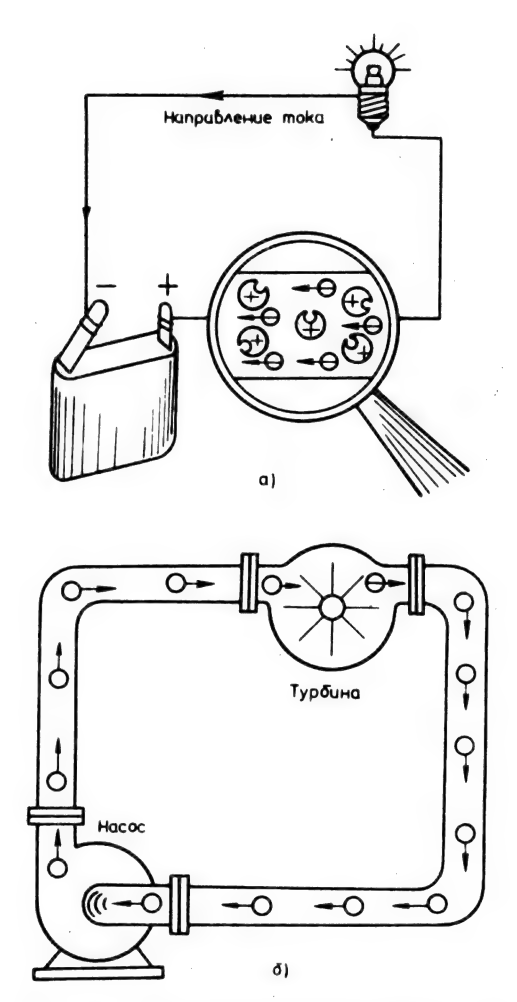


Рис. 3.3 *а*) свободные электроны движутся в направлении, противоположном принятому положительному направлению тока; *б*) каждый источник тока можно сравнить с водяным насосом, а потребитель — с турбиной

можно сказать, что *величина тока в неразветвленной электрической цепи везде одна и та же*, только в проводниках бо́льшего диаметра электроны движутся медленнее, чем в более тонких проводниках.

3.4. Скорость электрического тока

Электрическое поле распространяется по проводам со скоростью 300 000 километров в секунду. Эта скорость так велика, что за одну секунду поле может обойти земной шар около восьми раз!

Скорость направленного движения электронов в проводниках намного меньше и зависит от плотности тока.

По накаленной нити электрической лампочки электроны движутся со скоростью 1—2 сантиметра в секунду, в то время как в шнурах и кабелях эта скорость не превышает 2—3 миллиметров в секунду. Здесь может возникнуть вопрос: почему же говорят, что скорость электрического тока огромна?

Для того, чтобы разобраться в этом, представим себе несколько десятков кубиков, плотно сложенных по прямой линии на гладкой поверхности. Если толкнем первый кубик, то толчок дойдет до последнего кубика почти моментально, однако, скорость каждого кубика в отдельности не будет очень большой. Таким же образом при замыкании электрической цепи электрическое поле распространяется по проводнику с огромной скоростью и *почти одновременно приводит в движение как близкие, так и дальние электроны*. Вот почему и принято считать, что электрический ток распространяется по проводникам со скоростью около 300 000 километров в секунду.

3.5. Направление электрического тока

Мы уже выяснили, что в металлах электрический ток обусловлен только одним видом носителей зарядов — электронами. Однако в электролитах электрический ток обусловлен как электронами, так и положительными ионами. Подобную картину наблюдаем и в полупроводниках, где электрический ток обусловлен двумя видами заряженных частиц: электронами и *дырками* (дырки имеют свойства положительно заряженных частиц, т. к. представляют собой места, в которых отсутствуют электроны). На рис. 3.4*а* условно показан полупроводник, по ко-

торому не течет ток. Видно, что электроны и дырки движутся хаотично в различных направлениях вследствие теплового колебания. Если же полупроводник соединен с источником тока, то возникает электрическое поле, и *дырки начинают двигаться в направлении поля, а электроны — навстречу полю* (рис. 3.4*б*).

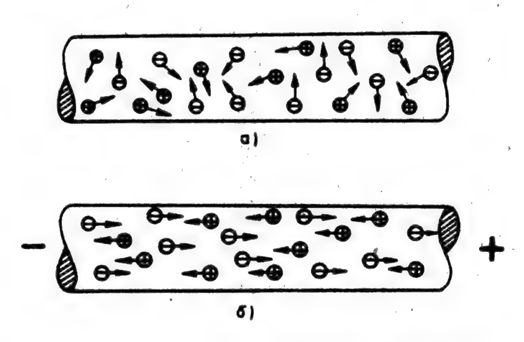


Рис. 3.4. *а*) внутренняя структура полупроводника при отсутствии электрического поля; *б*) направленное движение дырок и электронов при наличии электрического поля

Далее мы убедимся в том, что для ряда электротехнических правил необходимо ввести понятие **направления тока**. Однако мы уже видели, что в ряде случаев ток обусловлен двумя видами носителей зарядов (положительных и отрицательных), которые при наличии электрического поля движутся в противоположных направлениях.

Еще в прошлом веке было принято *под направлением электрического тока понимать направление движения положительных носителей зарядов* (тогда еще не знали, что ток в металлах обусловливается только электронами). По традиции это правило сохранилось и до сих пор, так что, согласно этому правилу, *направление тока в металлах противоположно направлению движения электронов*. Обращаем внимание на то, что на схемах стрелки, которые наносятся на проводники, показывают не направление движения электронов, а направление тока (рис. 3.3*а*).

Следовательно, *ток во внешней цепи течет в направлении от положительного полюса источника к отрицательному*.

3.6. Величина тока

Величина электрического тока измеряется количеством электричества, протекающего через поперечное сечение проводника за одну секунду. Единица величины тока называется **ампер (А)** в честь французского ученого **Андре Мари Ампера** (1775—1836).
Ток величиной в *1 ампер протекает в том случае, когда через поперечное сечение проводника за одну секунду протекает один кулон электричества*. Следовательно, можем записать:

$$1\,\text{ампер} = \frac{1\,\text{кулон}}{1\,\text{секунда}}.$$

В физике принято величину тока обозначать знаком I, количество электричества — Q, а время — t. Таким образом, приведенное выше равенство можно математически выразить формулой:

$$I = \frac{Q}{t}. \tag{3.1}$$

Это первая формула, которую мы встречаем в этой книге. Поэтому рассмотрим на примере, как ее использовать.

Пример 3.1. Какова будет величина тока, если через поперечное сечение проводника за 0,1 секунды протекает количество электричества 0,5 кулона?

Эта задача элементарна, но все же „в уме“ решить ее трудно. Здесь на помощь приходит математика. И действительно, подставляя в верхнюю формулу числовые значения, сразу получаем результат:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{0{,}5}{0{,}1} = 5\,\text{ампер}.$$

В радиоэлектронике обычно работают со сравнительно малыми токами (раньше ее называли еще слаботоч-

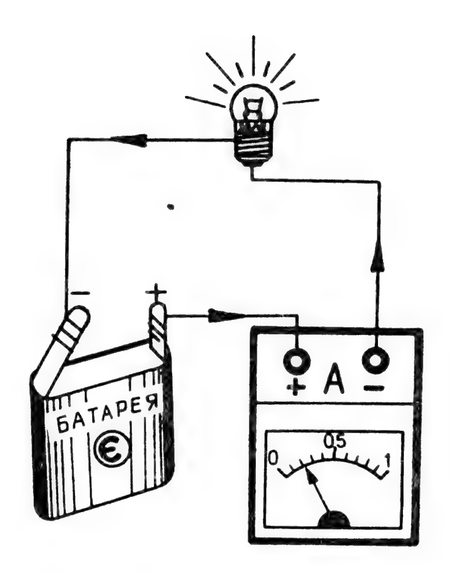


Рис. 3.5. С помощью амперметра измеряется величина тока в цепи

ной электротехникой). Поэтому на практике очень часто используются меньшие единицы: миллиампер (одна тысячная ампера) и микроампер (одна миллионная ампера), которые можно записать таким образом:

1мА = 0,001 А,
1 мкА = 0,000001 А.

В качестве примера можно напомнить, что ток, протекающий в радионаушниках, равен 1—2 мА; ток, потребляемый транзисторым радиоприемником, равен 10—20 мА; ток, протекающий по нити электролампочки карманного фонаря, равен 200—300 мА; ток в электроутюге — 1—2 А, в электроплитках — 3—6 А; ток, протекающий в электродвигателях средней величины, равен 10—20 А; ток во вторичной обмотке электросварочного аппарата — 100—300 А.

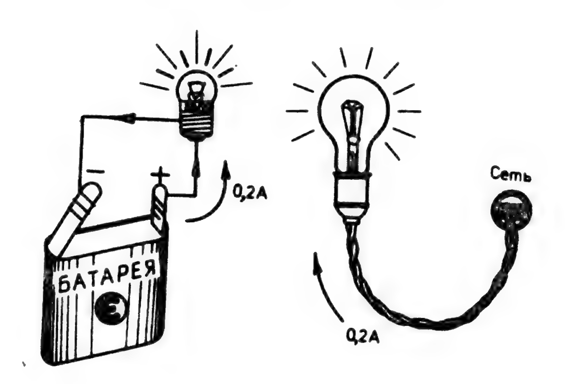
Величина тока измеряется специальным прибором, который называется **амперметр**. Его включают в цепь таким образом, чтобы протекающий через него электрический ток „входил" в положительную клемму, а „выходил" из отрицательной (рис. 3.5).

Иногда амперметры являются частью **комбинированных измерительных приборов**, снабженных соответствующим переключателем. Существуют и отдельные приборы — миллиамперметры и микроамперметры, которыми можно измерять очень малые токи.

3.7. Электрическое напряжение

Электрический ток, протекая через данный потребитель, производит какую-то работу, например, нагревает нить электрической лампочки, притягивает якорь электромагнита, приводит в действие ротор электродвигателя и т. д. *Производимая работа зависит не только от протекающего количества электричества, но и от приложенного напряжения*. В этом мы можем убедиться, рассмотрев рис. 3.6, на котором показаны лампочка для карманного фонарика и обыкновенная лампа накаливания в 40 ватт. Через обе лампы протекает ток примерно в 0,2 ампера, т. е. за единицу времени протекает одно и то же количество электричества. Однако вторая лампа светит намного ярче, потому что приложенное напряжение больше. Здесь может возникнуть вопрос: поскольку количество электричества одно и то же, то почему во втором случае электроны являются носи-

Рис. 3.6. В обеих цепях величина тока 0,2 А, однако во втором случае напряжение больше



телями бóльшей энергии и отличаются ли чем-нибудь входящие в лампу электроны от выходящих из нее?

За объяснением обратимся к рис. 3.7, на котором показаны два случая вытекания одного и того же количества воды, падающей с различной высоты. И здесь можно задать вопрос: почему во втором случае энергия водных частиц больше? Энергия частиц воды обусловлена земным гравитационным полем. Когда частицы падают в направлении поля, они выделяют энергию, которую можно использовать.

Таким же образом энергия электронов связана с электрическим полем, созданным источником тока. Это поле действует на каждый электрон так, что электроны при движении выделяют энергию. Но в то время как частицы воды падают всегда к центру земли, электроны „падают" от одного полюса источника тока к другому.

Напряжение между двумя точками электрической цепи *измеряется произведенной работой* по переносу единицы количества электричества из одной точки в другую. Единица измерения электрического напряжения называется **вольт (В)** в честь итальянского физика **Александро Вольта** (1745—1827).

Между двумя точками существует напряжение в 1 вольт, если для переноса одного кулона электричества произведена работа в один джоуль (единица джоуль рассматривается более подробно в 4.8). Следовательно, можно записать:

$$1\,\text{вольт} = \frac{1\,\text{джоуль}}{1\,\text{кулон}}.$$

В электротехнике принято напряжение обозначать буквой U, а работу или энергию — буквой A (обратите внимание, что в технике работа и энергия — одно и то же понятие). Таким образом, вышеприведенное равенство математически можно представить формулой:

$$U = \frac{A}{Q}. \qquad (3.2)$$

На примере посмотрим, как можно использовать эту формулу.

Пример 3.2. Найти напряжение на клеммах потребителя, если через них протекает количество электричества 0,002 кулона, а произведенная работа равна 0,08 джоуля.

Подставляем данные в формулу и получаем:

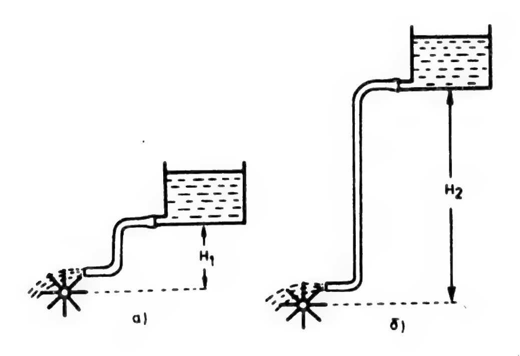
$$U = \frac{A}{Q} = \frac{0{,}08}{0{,}002} = \frac{80}{2} = 40\ \text{вольт}. \qquad (3.3)$$

Кроме единицы напряжения вольт, на практике часто используются более мелкие единицы: **милливольт** (одна тысячная вольта) и **микровольт** (одна миллионная вольта), которые можно записать таким образом:

1 мВ = 0,001 В,
1 мкВ = 0,000001 В.

Приведем несколько примеров: напряжение, которое радиопередатчики вызывают в приемных антеннах, представляет десятки и сотни микровольт, напряжение, вызываемое в микрофоне при наличии звука — десятки милливольт; напряжение на клеммах маленьких круглых батареек для транзисторных приемников — 1,5 В; напряжение на выводах плоской батарейки — 4,5 В; напряжение на клеммах автомобильных аккумуляторов — 12 В (есть аккумуляторы с напряжением 6 и 24 В); напряжение центральной бата-

Рис. 3.7. Давление воды тем больше, чем больше разница в уровнях



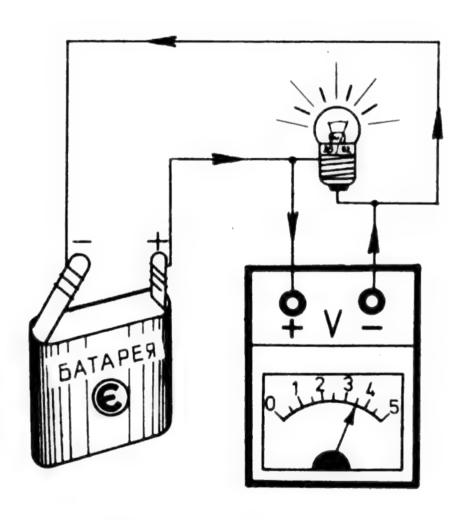


Рис. 3.8. С помощью вольтметра измеряется напряжение между двумя точками

реи телефонных аппаратов с центральным питанием — 60 В; напряжение в осветительной сети — 220 В; напряжение на линиях электропередач достигает 400 000 В; напряжение молнии — десятки миллионов вольт.

Для измерения напряжения используется специальный прибор — **вольтметр.** Когда нужно измерить напряжение между двумя точками данной электрической цепи, *вольтметр подключается к этим двум точкам без разрыва цепи* (рис. 3.8). Как и при включении амперметра, здесь тоже надо соблюдать полярность, т. е. ток должен „входить" через положительную клемму, а „выходить" — через отрицательную. Некоторые вольтметры являются частью комбинированных измерительных приборов снабжены переключателями для различных диапазонов.

3.8. Электрическое сопротивление

Мы уже знаем, что электрический ток в металлах представляет собой направленное движение электронов. При своем движении электроны сталкиваются с атомами, что затрудняет их движение. Если учесть, что атомы вещества совершают и тепловые колебания, становится ясно, что *все проводники оказывают определенное сопротивление электрическому току.*

Единица измерения электрического сопротивления называется **ом** (Ом) в честь немецкого физика **Георга Ома** (1787—1854). Сопротивление один Ом имеет такой проводник, через который протекает ток 1 ампер, если к концам его приложено напряжение 1 вольт.

Кроме единицы ом, на практике часто используются и бо́льшие единицы: килоом (тысяча ом) и мегаом (один миллион ом), которые можно записать таким образом:

1 кОм = 1000 Ом,
1МОм = 1 000 000 Ом.

Приведем несколько примеров: сопротивление шнура электроплитки около 0,01 Ом; сопротивление медного провода длиной 57 м и сечением 1 мм ^{2} — 1 Ом; сопротивление медного провода диаметром 0,10 мм (как человеческий волос) и длиной 10 м — около 20 Ом; сопротивление накаленной нити электрической лампочки мощностью 40 ватт — 1000 Ом, сопротивление человеческого тела между руками — от 5000 до 200 000 Ом (зависит от состояния кожи: влажная, грубая и т. д.).

Сопротивление в формулах обозначается буквой R. Сопротивление любого цилиндрического проводника можно найти по формуле:

$$R = \rho\frac{l}{S} \qquad (3.3)$$

где l — длина проводника в метрах, а S — его сечение в квадратных миллиметрах. Величина ρ (греческая буква „ро") называется *удельным сопротивлением* и для различных металлов имеет различные значения. Так, например, для серебра — $\rho = 0{,}016$, для меди $\rho = 0{,}017$, а для железа $\rho = 0{,}09$. Из формулы видно, что чем тоньше и длиннее проводник, тем больше величина его

сопротивления. Кроме того, сопротивление зависит и от вида металла.

Пример 3.3. Найти сопротивление медного провода длиной 200 м и сечением 1,5 мм ^{2}.

Подставляем числовые значения в формулу (3.3) и находим:

$$R=\rho\cdot\frac{1}{S}=0{,}017\frac{200}{1{,}5}=2{,}3\ \text{Ом}.$$

Для измерения сопротивления служит специальный прибор, который называется **омметр**. В нем имеется батарейка, а измеряемое сопротивление подключается прямо к его клеммам (рис. 3.9). Иногда омметр является частью *комбинированного измерительного прибора и имеет переключатель диапазонов*.

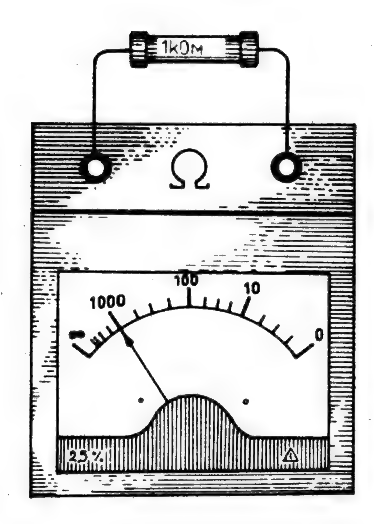


Рис. 3.9. С помощью омметра измеряется сопротивление

Сопротивление проводников зависит от их температуры. С увеличением температуры сопротивление всех металлов увеличивается, т. к. тепловые колебания атомов становятся более интенсивными, и направленное движение электронов затрудняется. Например, медный провод длиной 10 м и диаметром 0,20 мм при 20° С имеет сопротивление 5,6 Ом, а при температуре 50° С его сопротивление увеличивается до 6,8 Ом. Точно так же сопротивление нити электрической лампочки для карманного фонарика в холодном состоянии около 2 Ом, а при нагревании до 2000° С оно увеличивается до 17 Ом.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Вещества, в которых имеются свободные носители зарядов, называются проводниками. В изоляторах (диэлектриках) отсутствуют свободные носители зарядов.**
2. **Направленное движение свободных носителей зарядов называется электрическим током. Причиной движения носителей зарядов является воздействие электрического поля, которое источник тока создает в проводниках.**
3. **Направлением тока принято считать направление, в котором движутся положительные электрические заряды. Во внешней цепи электрический ток течет от положительного полюса источника тока к отрицательному.**
4. **Единица измерения силы тока — ампер, единица измерения электрического напряжения — вольт, единица измерения электрического сопротивления проводников — Ом.**
5. **Каждый проводник оказывает определенное сопротивление протекающему току. Это сопротивление измеряется в омах.**
6. **Чем длиннее и тоньше проводник, тем больше его сопротивление.**

4 Основные законы постоянного тока

4.1. Закон Ома для участка цепи

На рис. 4.1 показан опыт, который можно сделать самостоятельно. В первом случае яркость лампочки нормальная, а во втором — почти в два раза слабее. Как это объяснить?

Данная лампочка светит во столько раз слабее, во сколько меньше ток, протекающий через нее. Очевидно, во втором случае (рис. 4.1*б*) величина тока в цепи уменьшилась, поскольку „маршрут" электронов удлинился и, таким образом, сопротивление увеличилось. Кроме того, в первом случае напряжение батарейки действует целиком на лампочку, а во втором оно распределяется между двумя лампочками.

Подобными опытами устанавливаем, что *величина тока зависит как от приложенного напряжения, так и от сопротивления*. Точную зависимость между этими величинами определяет **закон Ома**. Он представляет *основную зависимость в электротехнике*. Для участка цепи закон Ома гласит: *величина тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению*, т. е.

$$\text{Величина тока} = \frac{\text{Напряжение}}{\text{Сопротивление}}$$

Выше были введены следующие обозначения: I — величина тока, U — напряжение, R — сопротивление. Поэтому закон Ома можно математически записать следующими тремя способами:

$$I=\frac{U}{R}; \quad U=IR; \quad R=\frac{U}{I}. \qquad (4.1)$$

Эти формулы позволяют найти одну из величин (ток, напряжение, сопротивление), если известны две другие. На рис. 4.2 показан простой способ, помогающий запомнить закон Ома: закрытая пальцем величина равна отношению или произведению остальных двух.

Рис. 4.1. При увеличении сопротивления величина тока уменьшается

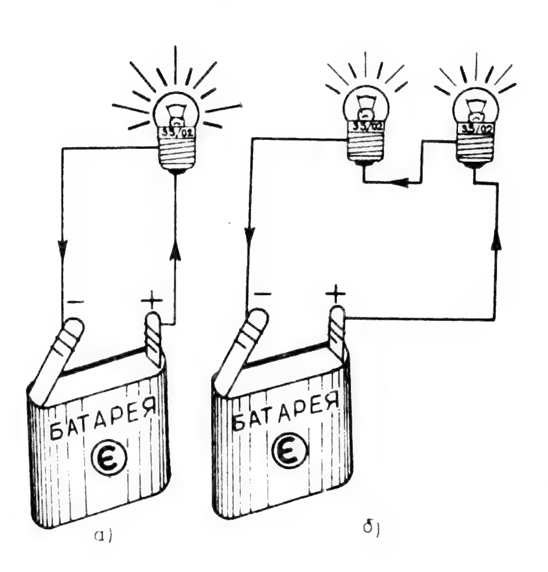
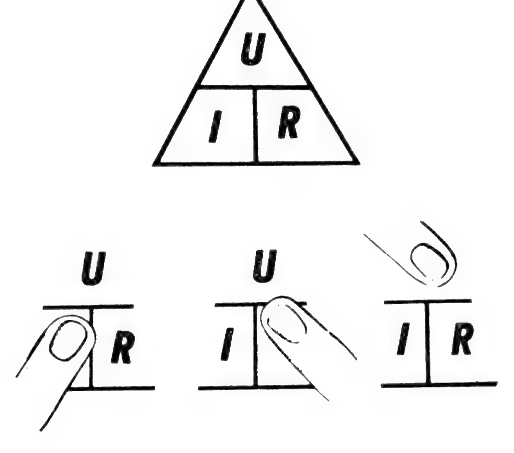


Рис. 4.2. Так легче запомнить закон Ома



Если мы хотим применить закон Ома (это относится ко всем формулам, в случае, что когда нет специальной оговорки), *величины должны быть выражены основными единицами и только тогда можно подставлять их в формулу*. Например, если величина тока 10 мА, то в формулу подставляем число 0,01 А, если сопротивление 47 кОм, то в формулу подставляем 47 000 Ом и т. д.

Пример 4.1. Какой величины ток протечет через сопротивление 50 кОм, если к обоим его концам приложим напряжение 250 В?

Используем закон Ома и получаем

$$I=\frac{U}{R}=\frac{250}{50\,000}=0{,}005\ \text{А}=5\ \text{мА}.$$

Пример 4.2. Напряжение на обоих концах маленькой лампочки 3,5 В, а величина протекающего тока 0,2 А. Найти сопротивление нити в нагретом состоянии.

Из закона Ома следует

$$R=\frac{U}{I}=\frac{3{,}5}{0{,}2}=17{,}5\ \text{Ом}.$$

Закон Ома можно применять не только к участку цепи, но и к целой цепи. Прежде чем рассмотреть этот вопрос, сначала кратко познакомимся с электрическими схемами.

4.2. Электрические схемы

В електротехнике очень часто используются схемы. Это чертежи, на которых с помощью условных знаков и линий обозначены отдельные детали и проводники, соединяющие их.

На рис. 4.3 показано соединение плоской батарейки с лампочкой. На этом же рисунке дана схема этого соединения. Видно, что батарейка и лампочка обозначены своими условными знаками, а соединяющие их проводники — прямыми линиями. Эти линии не наклонные, а вертикальные или горизонтальные.

На рис. 4.4 показаны некоторые основные электротехнические детали и их схемные обозначения. Обратите внимание на то, как обозначается пересечение проводников. Когда в схеме на пересечении проводников не поставлена точка, то это обозначает, что проводники не соединены между собой.

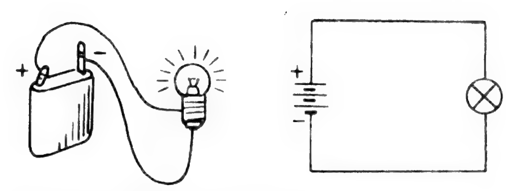


Рис. 4.3. Простая электрическая цепь

4.3 Падение напряжения

Мы уже знаем, что если на концах сопротивления имеется определенное напряжение, то через сопротивление протечет ток, величина которого определяется законом Ома. Это явление можно толковать и обратно: если через сопротивление протекает электрический ток, то на его концах образуется **падение напряжения** (разница потенциалов), величина которого определяется законом Ома.

На рис. 4.5*а* показано сопротивление R, через которое протекает ток величиной I. В этом случае на концах сопротивления образуется падение напряжения U, которое можно измерить вольтметром. Необходимо запомнить, что конец сопротивления, через который ток „входит“ — положительный (т. е. имеет более высокий потенциал) по сравнению с другим концом, через который ток „выходит“. На рисунке это обозначено знаками „+“ и „−“, где *плюс соответствует точке с более высоким потенциалом*.

Пример 4.3. Найти падение напряжения на концах сопротивления $R=15$ кОм, если через него протекает ток величиной $I=2$ мА.

Падение напряжения можно найти по закону Ома:

$$U=IR=0{,}002\ .\ 15\,000=30\ \text{В}.$$

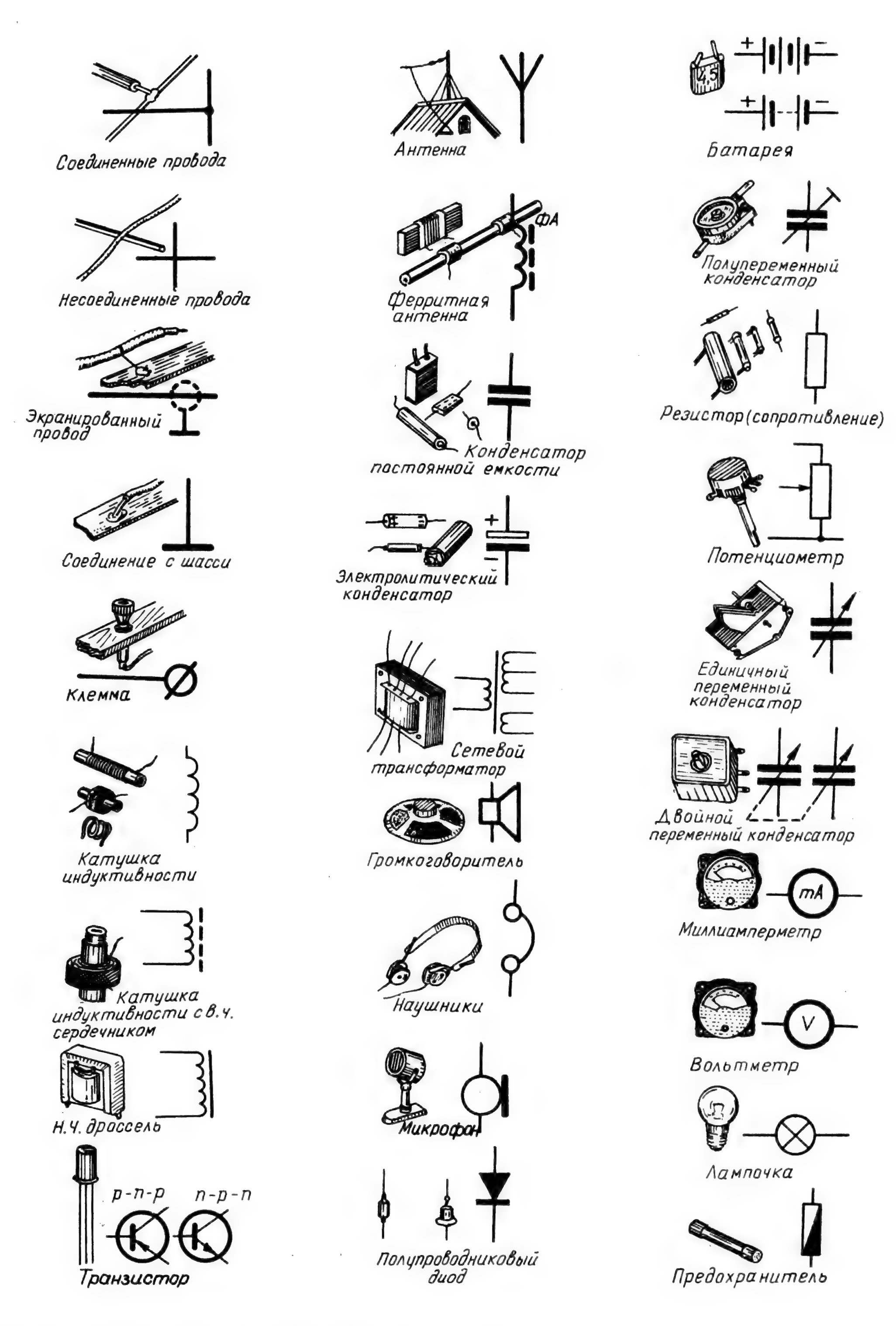


Рис. 4.4 Основные радиотехнические элементы и их схемы

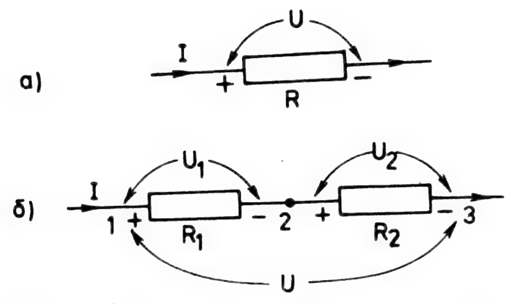


Рис. 4.5. *а*) ток через резистор течет от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким потенциалом; *б*) точка *2* имеет более низкий потенциал по сравнению с точкой *1* и более высокий по сравнению с точкой *3*

Понятия „более высокий" и „более низкий" потенциал *относительные*. Это видно из рис. 4.5*б*, где потенциал точки *2* ниже потенциала точки *1* и выше потенциала точки *3*. Из этого рисунка видно, что падения напряжений складываются. Например, общее падение напряжения U равно сумме двух падений напряжений U_1 и U_2.

4.4. Основные свойства источников тока

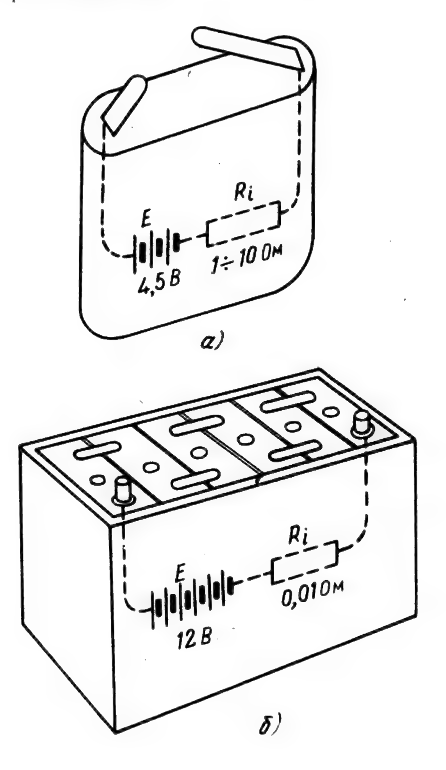
Каждый источник тока (батарея, аккумулятор, выпрямитель и пр.) можно охарактеризовать двумя величинами: **електродвижущей силой** (ЭДС), которая обычно обозначается буквой E и измеряется в вольтах, и **внутренним сопротивлением** R_i, которое измеряется в омах.

Можно сказать, что ЭДС есть напряжение, которое существует между полюсами источника тока в разомкнутой цепи, т. е. при отсутствии потребления. Практически ЭДС можно измерить *высокоомным вольтметром* (так называются вольтметры, по которым во время измерения протекает ничтожно малый ток; таковы ламповые вольтметры, вольтметры на полевых транзисторах и пр.).

Другая важная величина, характеризующая любой источник — его внутреннее сопротивление. Оно зависит от конструкции прибора, а в батареях и аккумуляторах обуславливается степенью разряда. Чем меньше внутреннее сопротивление источника тока, тем он лучше, потому что от него *можно потреблять бо́льший ток*.

На основании вышесказанного на рис. 4.6*а* плоская батарейка представлена условно ее ЭДС E, равной 4,5 В, и ее внутренним сопротивлением R_i, которое у новой батарейки равно от 1 до 10 Ом. (Когда батарейка разряжена, ЭДС уменьшается примерно на 4 В, а внутреннее сопротивление увеличивается до 100—500 Ом.) На рис. 4.6*б* представлен условно автомобильный аккумулятор со своей ЭДС и своим внутренним сопротивлением. Обратите внимание, что *аккумуляторы имеют очень малое внутреннее сопротивление, благодаря чему от них можно потреблять очень большой ток*, например, 50—100 А. (Заряженные аккумуляторы

Рис. 4.6. *а*) каждый источник тока характеризуется ЭДС (E) и внутренним сопротивлением R_i;
б) внутреннее сопротивление аккумулятора чрезвычайно мало



имеют чаще всего внутреннее сопротивление $R_i = 0{,}01$ Ом, в то время как в разряженном аккумуляторе внутреннее сопротивление увеличивается до 0,5 Ом.).

4.5. Закон Ома для замкнутой цепи

Закон Ома определяет величину тока в замкнутой цепи, составленной из источника тока и потребителя. Этот закон гласит: *величина тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока E и обратно пропорциональна сумме внутреннего сопротивления R_i источника тока и сопротивления R потребителя.* Математически это выражается так:

$$I = \frac{E}{R_i + R}. \qquad (4.2)$$

Пример 4.4. С плоской батарейкой с напряжением $E = 4{,}5$ В и внутренним сопротивлением $R_i = 5$ Ом соединена лампочка, имеющая сопротивление (в нагретом состоянии) $R = 17{,}5$ Ом. Найти величину тока в цепи.

Подставляем данные в верхнюю формулу:

$$I = \frac{E}{R_i + R} = \frac{4{,}5}{5 + 17{,}5} = 0{,}2 \text{ А}.$$

Этот случай схематично представлен на рис. 4.7*а*. Когда в цепи протекает ток величиной 0,2 А, то напряжение между полюсами батарейки падает до 3,5 В. Это получается за счет того, что одна *часть ЭДС (в данном случае $U_{Ri} = 1$ В) образует падение напряжения на внутреннем сопротивлении батарейки* или ЭДС разделяется на падение напряжения на потребителе и падение напряжения на внутреннем сопротивлении батарейки, т. е. $E = U + U_{Ri}$.

Если к полюсам той же батарейки подключить другой потребитель с сопротивлением $R = 1$Ом (рис. 4.7*б*), то легко определить, что ток в цепи равен $I = 0{,}75$ А. В этом случае падение напряжения на внутреннем сопротивлении будет $U_{Ri} = 3{,}75$ В, а напряжение между полюсами останется равным $U = 0{,}75$ В. Эти примеры показывают, что *с увеличением потребления напряжение между полюсами каждого источника тока уменьшается.* Это уменьшение тем больше, чем больше внутреннее сопротивление источника тока.

Интересно определить величину тока, если соединить нáкоротко полюса батарейки. (На практике это допустимо только на короткое время, т. к. приводит к быстрой разрядке батарейки.)

Пример 4.5. Найти ток короткого замыкания плоской батарейки, если $R_i = 1{,}5$ Ом и $E = 4{,}5$ В.

Используем закон Ома для замкнутой цепи (формула (4.2)), учитывая, что $R = 0$. Ток при коротком замыкании I_k получается

$$I_k = \frac{E}{R_i} = \frac{4{,}5}{1{,}5} = 3 \text{ А}.$$

Опыты показывают, что ток короткого замыкания в совсем новой плоской батарейке не превышает 3—5 А, и это наибольший ток, который можно получить от такой батарейки.

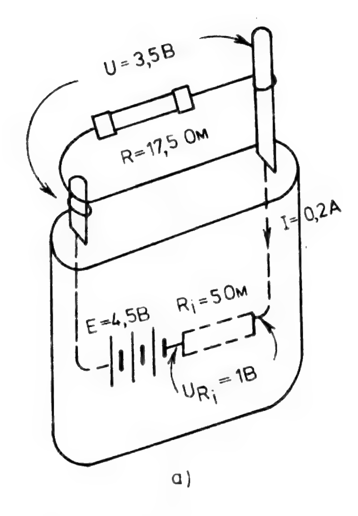
Путем измерения тока при коротком замыкании можно определить внутреннее сопротивление источника тока. (Повторяем, что это опасный режим для источников тока, поэтому измерение надо производить за очень короткое время, например, 1—2 секунды.)

Пример 4.6. Определить внутреннее сопротивление плоской батарейки, если $I_k = 0{,}5$ А и $E = 4{,}5$ В.

Используя закон Ома для замкнутой цепи и учитывая, что $R = 0$, для внутреннего сопротивления получаем:

$$R_i = \frac{E}{I_k} = \frac{4{,}5}{0{,}5} = 9 \text{ Ом}.$$

Если источник тока имеет очень малое внутреннее сопротивление, то его



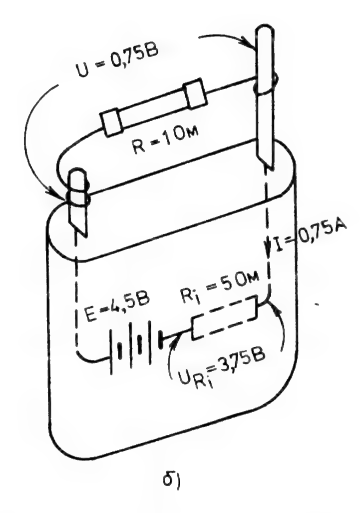


Рис. 4.7. *а*) напряжение между полюсами батарейки во время работы всегда меньше напряжения при отсутствии нагрузки; *б*) чем больше ток в цепи, тем меньше напряжение между полюсами

полюса нельзя соединять накоротко, т. к. подобный „эксперимент" может привести к повреждениям. Например, замыкание накоротко полюсов аккумулятора приведет к появлению опасно большого тока (примерно 100—300 А), что может расплавить провода и испортить аккумулятор.

4.6. Законы Кирхгофа

Выше мы рассматривали прохождение электрического тока в неразветвленной цепи. Однако радиоэлектронные устройства состоят из большого числа элементов, которые образуют сложные и разветвленные цепи. При расчете таких цепей используем законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа. Он относится к любому узлу сложной электрической цепи и гласит: *сумма токов, притекающих в любую узловую точку, равна сумме токов, вытекающих из нее*. Это наглядно показано на двух примерах, представленных на рис. 4.8. Этот закон — логическое следствие физической сущности электрического тока, т. к. носители зарядов не создаются, а только перераспределяются в разветвлениях цепи. Поскольку в математике сумма нескольких величин обозначается греческой буквой „сигма", то этот закон можно представить следующей формулой

$$\sum I_{пр} = \sum I_{выт}. \qquad (4.3)$$

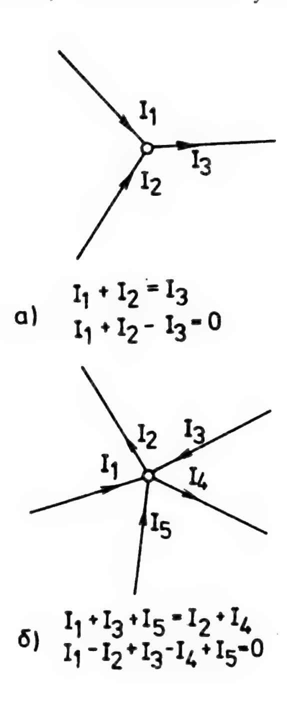


Рис. 4.8. Первый закон Кирхгофа для: *а*) трех токов в узле; *б*) для пяти токов в узле

Пример 4.7. К узловой точке притекают два тока I_1 и I_2, а вытекает ток I_3 (рис. 4.8*а*). Найти ток I_2, если $I_1 = 3$ мА и $I_3 = 7{,}5$ мА. На основании первого закона Кирхгофа можем написать $I_1 + I_2 = I_3$. Отсюда находим неизвестный ток

$$I_2 = I_3 - I_1 = 7{,}5 - 3 = 4{,}5 \text{ мА}.$$

Второй закон Кирхгофа. Этот закон относится к любому замкнутому контуру в сложной электрической цепи и гласит: алгебраическая сумма электродвижущих сил, действующих на каком-нибудь замкнутом участке цепи, равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях этого участка. Следовательно, для каждого замкнутого контура можем записать

$$\sum E = \sum (IR). \tag{4.4}$$

В этом законе упомянуто понятие „алгебраическая сумма", которое означает, что отдельные величины (ЭДС и падение напряжения) должны быть взяты со своими знаками. Поэтому, применяя закон, предварительно выбираем положительное направление обхода, и с учетом его подставляем отдельные величины в уравнение со знаком „плюс" или со знаком „минус" (рис. 4.9). Поясним на двух примерах, когда можно использовать второй закон Кирхгофа.



Рис. 4.9. Условное положительное направление тока, падения напряжения и ЭДС

Пример 4.8. На рис. 4.10*а* дана разветвленная цепь. Известны величины ЭДС батареи, сопротивлений R_1 и R_2, и тока I_1 (место измерения обозначено крестиком). Найти величину тока I_2.

Применяем второй закон Кирхгофа для замкнутого контура *I*, принимая за положительное направление по ходу часовой стрелки. В этом случае как ЭДС, так и оба падения напряжения будут положительны. Итак, получаем

$$E = I_2 R_2 + I_1 R_1.$$

Из этого уравнения можно найти неизвестный ток I_2:

$$I_2 = \frac{1}{R_2}(E - I_1 R_1) = \frac{1}{4000}(9 - 0{,}001 \,.\, 7000) = \frac{2}{4000} \text{ А} = 0{,}5 \text{ мА}.$$

Пример 4.9. На рис. 4.10*б* дана разветвленная цепь. Известны величины R_1, R_2, R_3 и токи I_1 и I_3. Найти величину и направление тока I_2, протекающего через R_2.

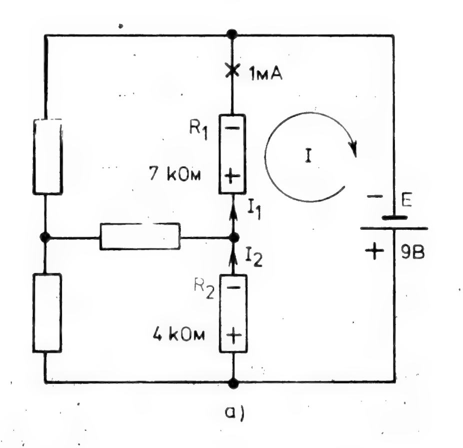
Применяем второй закон Кирхгофа для замкнутого контура II, принимая за положительное направление по часовой стрелке. В этом случае падение напряжения на R_1 будет положительным, а падение напряжения на R_3 — отрицательным. Поскольку направление тока через R_2 неизвестно, принимаем условно, что он течет от т. 1 к т. 2 (если получим для тока I_2 положительное значение, значит выбрано правильное направление, а если отрицательное — значит в действительности он протекает в направлении от т. 2 к т. 1). При таком выборе направлений с учетом того, что в этом замкнутом контуре нет ЭДС, т. е. $E = 0$, можем записать

$$0 = I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3.$$

Отсюда можно найти неизвестный ток I_2:

$$I_2 = \frac{1}{R_2}(I_3R_3 - I_1R_1) = \frac{1}{2000}(0{,}001.1000 - 0{,}00024.5000) = \frac{-0{,}2}{2000} = -0{,}0001 \text{ А.}$$

Поскольку ток получился отрицательным, ясно, что в действительности он течет в направлении от т. 2 к т. 1 (рис. 4.10*б*). Величина падения напряжения между точками *2* и *1* равна $U_{21} = I_2R_2 = 0{,}0001 \,.\, 2000 = 0{,}2$ В.



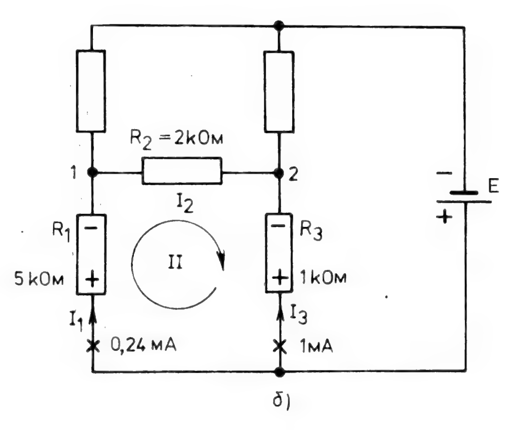


Рис. 4.10. Иллюстрации к примеру 4.9

4.7. Мощность электрического тока

Как известно, все электродвигатели потребляют из сети электрическую энергию, которая превращается в механическую работу. Один большой электродвигатель может совершить определенную работу за 1 час, а один маленький двигатель может выполнить эту работу, например, за 20 часов. В этом случае говорим, что первый электродвигатель имеет бóльшую мощность. Аналогичный пример с двумя электрическими конфорками — большой и маленькой, т. к. одно и то же количество воды согреется на мощной конфорке намного быстрее.

Из физики известно, что *мощность измеряется работой, совершенной за единицу времени.* Чем больше напряжение и ток, тем больше электрическая мощность. Поэтому она является произведением величин напряжения и тока:

мощность = напряжение . ток.

Если ввести такие обозначения: P — мощность, U — напряжение, I — ток, то можно записать формулу мощности

$P = UI.$

Единица измерения мощности называется **ватт** (Вт) в честь английского ученого **Джеймса Уатта** (1736—1819). *Один ватт мощности получаем при напряжении 1 вольт и токе 1 ампер.*

Если в формуле мощности заменить последовательно напряжение и ток из закона Ома (см. формулу (4.1)), то получатся следующие важные зависимости, которые можно использовать в дальнейшем

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}. \qquad (4.5)$$

Пример 4.10. Какова мощность электрической лампочки для карманного фонарика, если при напряжении 3,5 В она потребляет ток 0,2 А (см. рис. 4.7*а*)?

Подставляем данные в формулу мощности и получаем

$P = UI = 3{,}5 \,.\, 0{,}2 = 0{,}7$ Вт.

Кроме единицы ватт в радиоэлектронике часто используют и меньшие

единицы: **милливатт** (одна тысячная ватта) и **микроватт** (одна миллионная ватта), которые можно записать в виде

1 мВт = 0,001 Вт;
1 мкВт = 0,000 001 Вт.

Приведем несколько примеров: мощность, необходимая для действия радионаушников — 0,00001 Вт, мощность небольшого динамика для транзисторного приемника около 0,1 Вт, мощность динамиков, используемых в радиоприемниках и телевизорах — 0,5—3 Вт, мощность обычных ламп накаливания — $25 \div 100$ Вт, мощность, потребляемая ламповым телевизором, около 200 Вт, мощность электроутюга — $300 \div 700$ Вт, мощность электроплит и электрических нагревателей воды — $2000 \div 5000$ Вт. Добавим еще, что в сильноточной технике используют машины и аппараты большой мощности, например, тысячи киловатт (1 кВт = 1000 Вт).

Для измерения мощности используют специальный измерительный прибор, который называется *ваттметром*.

4.8. Электрическая энергия

Потребляемая электрическая энергия зависит как от мощности потребителя, так и от времени, в течение которого он был включен. Так, например, энергия, потребляемая электроплиткой за 5 часов, в пять раз больше энергии, потребляемой за 1 час. А вот и другой пример: за 1 час одна лампочка в 100 ватт потребляет в 2 раза больше энергии, чем одна лампочка в 50 ватт за то же время. Поскольку электрическая энергия прямо пропорциональна мощности и времени, можем записать следующую зависимость:

$$A = P \,.\, t = UI \,.\, t \qquad (4.6)$$

Единицей измерения всех видов энергии является **джоуль** (Дж) в честь английского ученого **Джеймса Джоуля** (1818—1889). *Это работа (энергия), которая совершается силой в один ньютон для перемещения тела на расстояние 1 метр.* В электротехнике для измерения энергии часто используется единица **ватт-секунда** (Вт. с), равная одному джоулю. На практике потребляемая электрическая энергия измеряется единицей **киловатт-час** (кВт. ч). *Это енергия, которую получает потребитель мощностью 1 кВт в продолжение 1 часа.*

Электрическую энергию измеряют специальным прибором, который называется *электрическим счетчиком*. Каждый дом и каждое предприятие имеет собственный счетчик, который отсчитывает потребляемую электрическую энергию.

Пример 4.11. Какова стоимость электрической энергии, потребленной за 1 месяц одной электрической лампочкой мощностью $P = 75$ Вт, если каждый вечер она горит по 6 часов, а 1 киловватт-час электроэнергии стоит 4 коп.

Сначала находим общее время потребления $t = 30 \,.\, 6 = 180$ час. Потребляемая энергия $A = P \,.\, t = 75 \,.\, 180 =$ 13 500 ватт-час = 13,5 киловатт-час. Тогда искомая стоимость будет

$$N = 13{,}5 \,.\, 4 = 54 \text{ коп.}$$

4.9. Тепловое действие электрического тока

При своем движении в проводниках носители зарядов отдают часть своей энергии атомам и молекулам вещества. Поэтому *любой проводник, по которому протекает ток, более или менее нагревается.* Это электрическая энергия, которая превращается в тепловую и напрасно нагревает проводники. Чем больше ток и больше сопротивление проводника, тем больше энергия, отдаваемая в виде тепла. Электрическая мощность, выделенная в виде тепла, может быть вычислена по одной из формул выражения (4.5).

Пример 4.12. Через сопротивление 50 Ом протекает ток 2 А. Найти электрическую мощность, которая превращается в тепло.

Подставляем в формулу (4.5.) и получаем

$P = I^2R = 2^2.50 = 200$ Вт.

Пример 4.13. Какое напряжение нужно приложить к концам спирали, имеющей сопротивление 10 Ом (в нагретом состоянии), чтобы получить нагреватель мощностью 1000 Вт?

Используя формулу (4.5), получаем

$U = \sqrt{P.R} = \sqrt{1000.10} = \sqrt{10\,000}$

$= 100$ В.

При наличии одной замкнутой цепи величина тока повсюду одна и та же и нагревается она больше всего там, где сопротивление больше.

Например, сопротивление шнура утюга около 0,01 Ом, а сопротивление спирали (в накаленном состоянии) около 80—100 Ом, поэтому именно на ней сосредотачивается почти все тепло. То же самое наблюдаем и в плавких электрических предохранителях (пробках), *в патрон которых нарочно вкладывается тонкая проволочка.* При коротком замыкании ток в электропрово́дке становится очень большим (например, 30—80 А), проволочка плавится, и цепь разрывается. А если заложим в патрон толстый провод (или много тонких проволочек), то при коротком замыкании в электропроводке протечет недопустимо большой ток, который может повредить проводку и вызвать пожар. Следовательно, в поврежденные пробки нельзя вставлять толстые проволочки или пучок тонких проволочек, а следует использовать новые предохранительные патроны. Если при повторной смене предохранительных патронов пробки продолжают перегорать, это говорит о коротком замыкании где-то в электропроводке и ее надо исправить.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Закон Ома — основной закон в электротехнике. Он определяет связь между величиной тока, напряжения и сопротивления. Применяемый к участку цепи, он гласит: Величина тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.**
2. **Каждый источник тока характеризуется, в основном, двумя величинами: электродвижующей силой (ЭДС) и внутренним сопротивлением.**
3. **Если электрическая цепь не разветвлена, то величину тока можно вывести из закона Ома для замкнутой цепи. В разветвленных и сложных цепях величину токов находим, используя первый и второй законы Кирхгофа.**
4. **При использовании электротехнических законов все величины должны быть приведены к основным единицам, и только тогда можно подставлять их в формулы.**
5. **Единица мощности электрического тока — ватт. Единица энергии — джоуль. На практике электрическая энергия измеряется едининцей киловатт-час.**
6. **В предохранители вставляются тонкие проволочки для того, чтобы при коротком замыкании перегорели именно они, а не электропрово́дка.**

5 Переменный ток

5.1. Сущность переменного тока

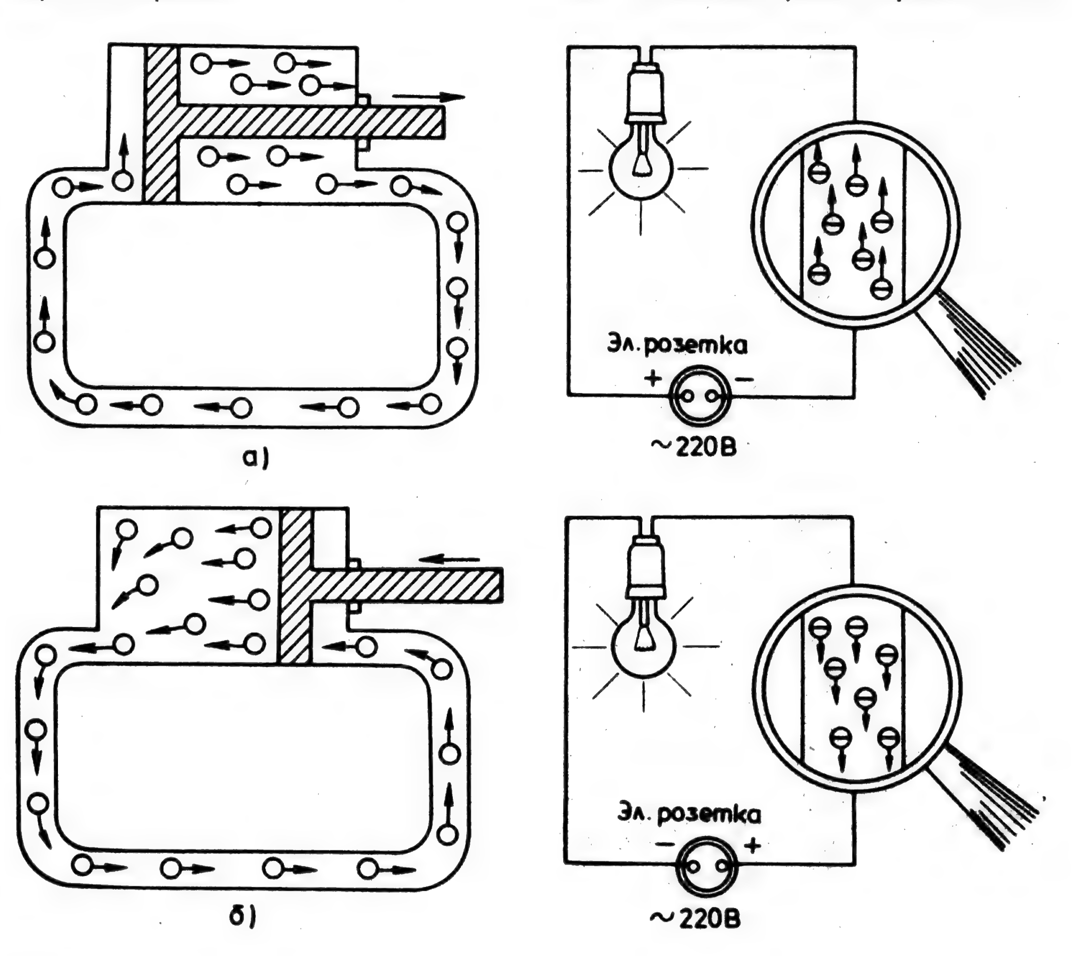
В предыдущих главах мы рассмотрели постоянный ток. Он характерен тем, что протекает равномерно в определенном направлении. В радиоэлектронике и промышленности, однако, используется не только постоянный, но и *переменный ток*. Так, например, в электрической сети ток переменный.

Чтобы разобраться в его сущности, рассмотрим рис. 5.1, на котором показана замкнутая система труб, содержащих воду. Когда поршень движется направо и налево, частицы воды движутся по трубе то в одном, то в другом направлении.

Аналогичный характер имеет дви-

Рис. 5.1. *а*) при движении поршня направо частицы воды движутся в указанном направлении; *б*) при движении поршня налево они движутся в обратном направлении

Рис. 5.2. Физическая сущность переменного тока



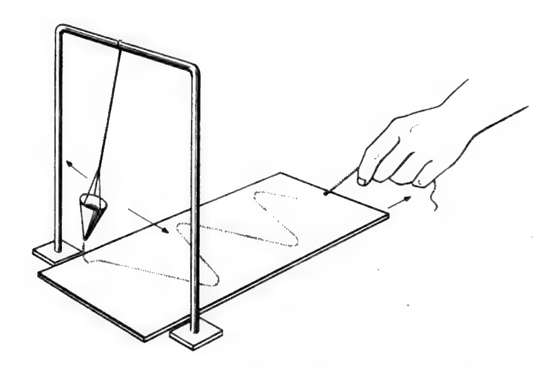


Рис. 5.3. При движении картона качающийся конусный сосуд вычерчивает синусоиду

жение электронов в проводниках, когда потребляем ток из электрической сети (это показано условно на рис. 5.2), но за одну секунду они совершают 50 колебаний. Из этого примера следует, что при переменном токе электроны совершают движения, напоминающие качания маятника. Подобный случай показан на рис. 5.3, на котором раскачивается конусный сосуд, из которого вытекает песок и падает на картон. Если картон неподвижен, песок будет вычерчивать прямую линию. Но если равномерно двигать картон, то песок вычертит интересную кривую линию, которая называется *синусоида* (это название происходит от синусоидальной функции, с помощью которой эта кривая выражается математически). Синусоиду можно получить и с помощью амперметра, если удлинить его стрелку соответствующим записывающим механизмом, который может чертить на подвижном картоне (рис. 5.4). Для того, чтобы получить хорошую синусоиду, надо медленно изменять ток, протекающий через амперметр, например 1—2 изменения в секунду. Если для этого опыта использовать ток от электрической сети, то желаемого результата не будет. Причина в инертности стрелки, из-за которой она не может произвести 50 колебаний за 1 секунду.

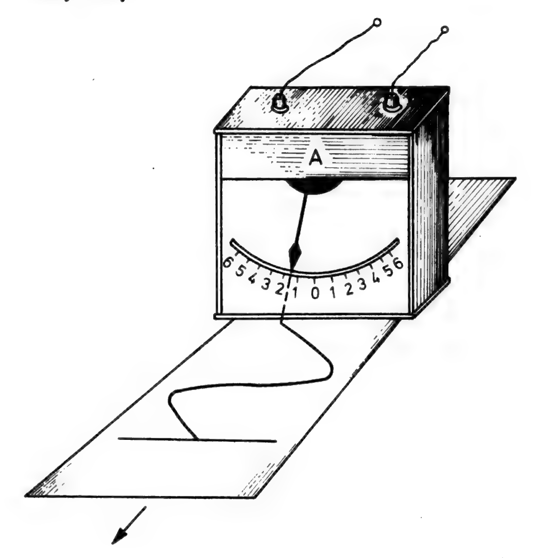
Когда осветительная лампа питается от сети, электроны в ее накаленной нити движутся то в одну, то в другую сторону, совершая 50 колебаний в секунду. Но этих колебаний человеческий глаз не замечает, потому что накаленная до 2500°С нить имеет тепловую инертность и за 1/50 часть секунды не может остыть. Поэтому лампочка не мигает. Однако, если внимательно прислушаться к включенному радиоаппарату или телевизору, то услышим гудение, вызванное переменным током.

Но означает ли это, что за 1/100 долю секунды электроны от электростанции доходят до нашего дома, а за следующую 1/100 долю секунды возвращаются обратно?

В п. 3.4 мы выяснили, что электрическое поле распространяется в проводниках со скоростью 300 000 километров в секунду, в то время как сами электроны движутся в проводниках направленно со скоростью несколько миллиметров в секунду. Но за 1/100 часть секунды электроны только успеют переместиться в одном направлении, как электрическое поле начнет действовать в противоположном направлении.

Вот почему *электроны отклоняются то в одну, то в другую сторону, но ни в коем случае не покидают наш дом.*

Рис. 5.4. При неподвижном амперметре и подвижном картоне проекция стрелки вычерчивает синусоиду



Следовательно, эти электроны не приходят с электростанции, а являются нашими „домашними" электронами.

После того, как мы выяснили сущность переменного тока, можно было бы задать вопрос: не могут ли электростанции производить постоянный ток? Зачем эти усложнения?

Хотя это и выглядит невероятным, но *переменный ток получить легче, чем постоянный, потому что машины, „производящие"* переменный ток (т. наз. генераторы) имеют более простое устройство, чем машины для получения постоянного тока (т. наз. динамомашины). Кроме того, переменный ток в отличие от постоянного можно легко трансформировать, а это имеет первостепенное значение как для передачи, так и для потребления электроэнергии.

5.2. Синусоидальные колебания

Как мы уже знаем, изменения тока в электрической сети происходят по синусоидальному закону. К этому следует добавить, что синусоидальные колебания очень часто встречаются в природе и технике. Например, синусоидальными являются колебания не только маятника, но и струн, пластинок и т. д. В радиоэлектронике синусоидальные токи и напряжения имеют широкое применение. Поэтому коротко рассмотрим особенности этих колебаний.

Любое синусоидальное колебание (ток или напряжение) характеризуется следующими более важными величинами:

а) Период *T*. Это время совершения одного полного колебания (рис. 5.5). Половина этого времени называется *полупериодом*. Очевидно, *в один полупериод ток течет в одном направлении (которое условно можем принять за положительное), а в другой полупериод он течет в другом направлении (которое можем принять за отрицательное).* Обычно положительный

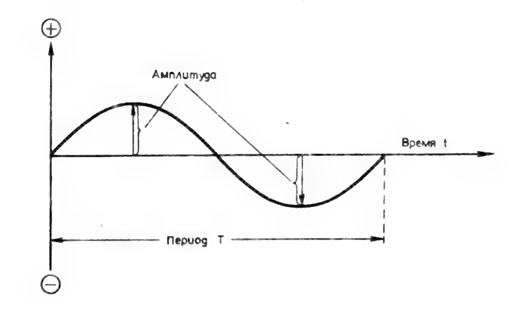


Рис. 5.5. Амплитуда и период синусоидального колебания

полупериод вычерчивается над абсциссой, а отрицательный — под ней (фиг. 5.5). В качестве примера можем указать, что период переменного тока в электрической сети $T=\frac{1}{50}$ с $=0{,}02$ с. *В радиоэлектронике, однако, используются переменные токи, период которых составляет тысячные и миллионные доли секунды.* Поэтому, кроме секунды, часто используются и другие единицы времени:

1 мс (миллисекунда) = 0,001 с;
1 мкс (микросекунда) = 0,000 001 с;
1 нс (наносекунда) = 0,000 000 001 с;
1 пс (пикосекунда) = 0,000 000 000 001 с.

б) Частота *f*. Это число колебаний в секунду. Частота измеряется в единицах **герцах** (Гц). Единица названа в честь немецкого ученого **Генриха Герца**. Например, частота тока в осветительной сети $f=50$ Гц. Как мы уже говорили, в радиоэлектронике используются колебания, частота которых составляет миллионы и миллиарды герц. Поэтому часто используются единицы

1 кГц (килогерц) = 1000 Гц;
1 МГц (мегагерц) = 1 000 000 Гц;
1 ГГц (гигагерц) = 1 000 000 000 Гц.

Период и частота любого колебания связаны между собой простыми формулами

$$T=\frac{1}{f};\quad f=\frac{1}{T}. \qquad (5.1)$$

При помощи этих формул можно найти одну величину, если знаем другую.

в) Амплитуда. Это наибольшая (максимальная) величина напряжения (U_m) или тока (I_m), которую они получают при своем изменении (рис. 5.5). Очевидно, за один период синусоидальный ток и напряжение достигают два раза своей максимальной величины.

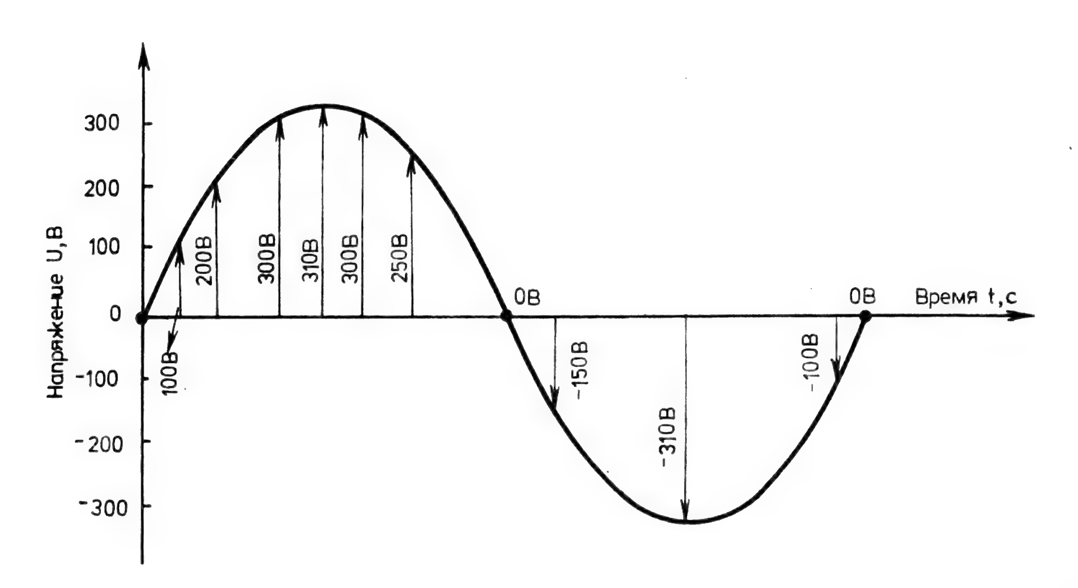
г) Мгновенное значение. Мы уже знаем, что переменный ток непрерывно изменяет свое направление и величину. *Величина напряжения в данный момент называется мгновенным значением напряжения.* Это же относится и к величине тока. В качестве иллюстрации на рис. 5.6 *стрелками* указаны несколько мгновенных значений величины напряжения в электрической сети в продолжение одного периода. Видно, что в начальный момент напряжение равно нулю, после чего постепенно нарастает до 100 В, 200 В и т. д. Достигнув максимального значения 310 В, напряжение начинает постепенно уменьшаться до нуля, после чего изменяет свое направление и снова возрастает, достигая величины 310 В и т. д.

д) Действующее значение. Какому *постоянному* напряжению равно по своему действию *переменное* напряжение, указанное на рис. 5.6? Теория и практика показывают, что оно равняется постоянному напряжению величиной 220 В (рис. 5.7). Это действительно так, поскольку рассматриваемое в течение одного периода переменное напряжение имеет значение 310 В только в два момента, а в остальное время оно меньше. Так как синусоидальные величины *изменяются непрерывно*, то целесообразно ввести понятие — действующее значение. *Под действующим значением переменного тока понимаем такой постоянный ток, который за то же самое время совершает ту же работу (или выделяет такое же количество тепла), что и данный переменный ток.*

Таким же образом определяем и понятие действующего значения переменного напряжения. Именно поэтому говорится, что действующее значение напряжения сети равно 220 В.

Доказано, что между амплитудными и действующими значениями си-

Рис. 5.6. Синусоидальное напряжение непрерывно изменяет величину и знак своей амплитуды



нусоидального напряжения и тока существуют следующие зависимости:

$$U_m = 1{,}4\ U; \quad U = 0{,}7\ U_m;$$
$$I_m = 1{,}4\ I; \quad I = 0{,}7\ I_m. \qquad (5.2)$$

Здесь U_m и I_m — амплитудные значения, а U и I — действующие (иногда действующие значения обозначают $U_{эф}$ и $I_{эф}$).

Амперметры и вольтметры, предназначенные для измерения переменного тока и напряжения, *отсчитывают не амплитудные, а действующие значения тока и напряжения*.

Введение понятия действующего значения и действующего напряжения переменного тока очень удобно. Так, например, законы Ома, Кирхгофа и пр. остаются в силе и для переменного тока, если в них подставить действующие значения участвующих величин. Кроме того, ряд потребителей могут работать как с постоянным, так и с переменным током. Например, лампочка в 12 вольт светит одинаково как при постоянном, так и при переменном напряжении с действующим значением 12 В.

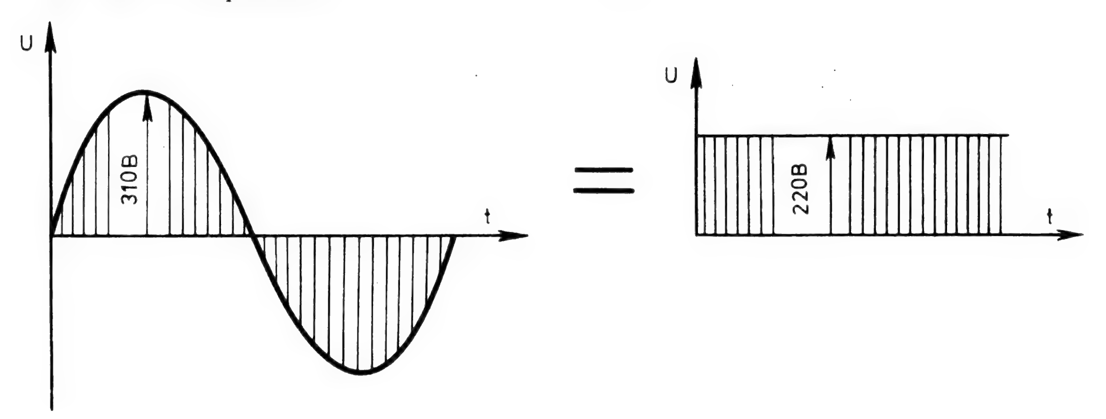


Рис. 5.7. Синусоидальное напряжение с амплитудой 310 В равнозначно постоянному напряжению величиной 220 В

5.3. Токи низкой и высокой частоты

В радиоэлектронике переменные токи частотой от 10 до 20 000 Гц называются **токами низкой (звуковой) частоты**. Источниками низкочастотного напряжения являются микрофоны, электрические мембраны проигрывателей, магнитофонные головки, специальные звуковые генераторы и пр. Напряжения, получаемые от них, вообще малы и подлежат усилению. Когда через динамик или наушники протекает переменный ток низкой частоты, то в них возникает звук.

Токи и напряжения частотой выше 20 000 Гц называются **высокочастотными**. Они получаются в специальных устройствах, называемых автогенераторами. Если через наушники или динамик пропустить ток высокой частоты, наше ухо не услышит звука. Однако токи высокой частоты имеют ряд интересных свойств, которые в дальнейшем мы рассмотрим более подробно. Они имеют очень большое значение в радиоэлектронике.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Электрический ток, который периодически изменяет свое направление и величину, называется переменным током. Любой переменный ток характеризуется в основном своей частотой, амплитудой и действующим значением.**
2. **Приборы, предназначенные для измерения переменного тока, показывают его действующее значение.**
3. **Законы Ома, Кирхгофа и пр. остаются в силе и в отношении переменного тока, если в них подразумеваем действующие значения.**
4. **Переменные токи частотой от 20 до 20 000 Гц называются токами низкой (звуковой) частоты.**
5. **Переменные токи частотой выше 20 000 Гц называются токами высокой частоты. Они имеют большое значение в радиоэлектронике.**

6 Сопротивления и резисторы

6.1. Активные сопротивления

Сопротивления, которые мы рассматривали до сих пор, называются активными (далее мы увидим, что имеются и реактивные сопротивления).

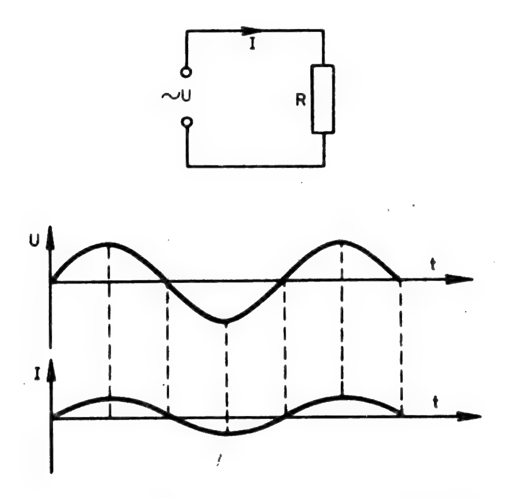


Рис. 6.1. При активных сопротивлениях синусоидальное напряжение и синусоидальный ток находятся в фазе

Важнейшие особенности активных сопротивлений следующие:

1. Их мощность чисто активна, т. е. поданная электроэнергия *целиком преобразуется в другие виды энергии*, например, тепловую, механическую, световую, звуковую и т. д.

2. При прохождении переменного тока через активное сопротивление *фазы тока и напряжения совпадают*. Это значит, что синусоидальные изменения тока и напряжения происходят одновременно, т. е. когда напряжение равно нулю, то и ток равен нулю, когда напряжение максимально, то и ток имеет максимум и т. д. (рис. 6.1).

6.2. Резисторы

Очень распространенными деталями в радиоэлектронике являются резисторы (рис. 6.2). С их помощью создаются падения напряжений, формируются подходящие потенциалы, ограничивается ток и т. д. По существу, *резисторы представляют собой активные сопротивления*, поскольку они превращают электрическую энергию в тепловую.

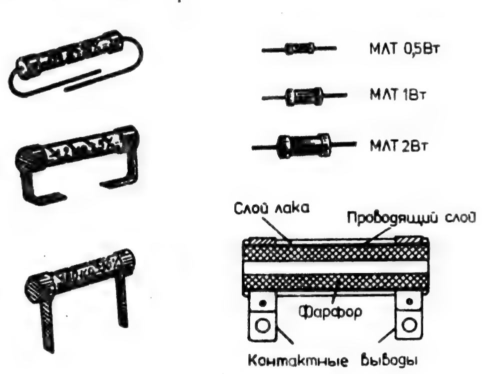
Различаем два основных вида резисторов: *химические и проволочные*. Как одни, так и другие могут быть *постоянными и переменными*.

Химические резисторы постоянного значения представляют собой керамические цилиндрические тела, на которые наносится тонкий проводящий слой углерода или специальный металлический сплав.

С обоих концов цилиндра имеются выводы для припайки (см. рис. 6.2). Весь резистор снаружи покрыт специальным защитным лаком.

Проволочные сопротивления представляют собой керамические тела, на которые намотан провод. Эти резисторы используются реже, они находят

Рис. 6.2. Резисторы



применение в сетях с большими токами и для специальных целей.

Важнейшие параметры (технические характеристики) резисторов: номинальное значение, класс точности и мощность рассеивания.

6.3. Классы точности резисторов

На корпус каждого резистора наносится его величина. По производственным причинам обозначение на корпусе не всегда совпадает с настоящей величиной резистора. Отклонение истинного значения от маркировочного называется **допуском**. В зависимости от допуска резисторы делятся на три класса точности. В первом классе допуск 5%, во втором — 10%, а в третьем классе — 20% от номинального значения. Например, имеем резистор 1 класса, на котором написано 100 кОм. Это значит, что действительное значение может варьировать в пределах 5%, т. е. от 95 до 105 кОм. Если такой же резистор имеет III класс точности, то действительное его значение может варьировать в пределах 20%, т. е. от 80 до 120 кОм.

6.4. Значения резисторов

Значения промышленных резисторов стандартизованы. Так, например, как бы мы ни искали резистор со значением 171 кОм, мы не сможем его

Таблица 6.1

I класс	10	11	12	13	15	16
	18	20	22	24	27	30
	33	36	39	43	47	51
	56	62	68	75	82	91
II класс	10	12	15	18	22	27
	33	39	47	56	68	82
III класс	10	15	22	33	47	68

Обозначение	Значение
R – 27	27 Ом
R – 160	160 Ом
R – 680	680 Ом
R – 1K	1k Ом
R – 0,001	
R – 10K	10k Ом
R – 0,01	
R – 100K	100k Ом
R – 0,1	
R – 0,33	330k Ом
R – 0,51	510k Ом
R – 1,0	1M Ом
R – 1M	
R – 3,3	3,3M Ом

Рис. 6.3. Сокращенные обозначения величины резисторов

найти, а в магазинах нам предложат близкие по значению 160 или 180 кОм. В таблице 6.1 указаны стандартные значения выпускаемых промышленностью резисторов. Эти данные могут умножаться на 0,1; 1; 10; 100; 1000 и т. д. Так, например, резисторы II класса производятся со значениями: 18, 180, 1800, 18 000, 180 000 Ом и т. д.

Часто значения резисторов обозначают сокращенно так, как это показано на рис. 6.3. Резисторы со значением от 1 до 999 Ом обозначаются только числом, а начиная с 1000 Ом используются и буквы. Тысячи омов обозначают

Рис. 6.4. При цветовом обозначении кольца и точки различного цвета наносятся на резисторы

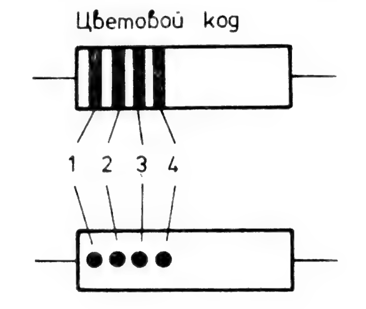


Таблица 6.2.

Цвет	Кольцо или точки 1 Первая цифра	 2 Вторая цифра	 3 Число нулей	 4 Допуск
Черный	—	0	—	—
Коричневый	1	1	0	1
Красный	2	2	00	2
Оранжевый	3	3	000	—
Желтый	4	4	0000	—
Зеленый	5	5	00000	—
Синий	6	6	000000	—
Фиолетовый	7	7	—	—
Серый	8	8	—	—
Белый	9	9	—	—
Золотистый	—	—	—	5
Серебристый	—	—	—	10
Неокрашенный	—	—	—	20

строчной буквок **к** (кило), а миллионы омов — заглавной буквой **М** (мега), которую иногда не пишут на корпусе (см. рис. 6.3). В этом случае допустимые значения обозначают в процентах. Иногда значение резисторов обозначают цифрами и буквами: буква Е обозначает омы, к — килоомы, М — мегаомы. Например, Е39 обозначает 0,39 Ом, 3Е9 — 3,9 Ом, 39Е — 39 Ом, к39 — 0,39 кОм = 390 Ом, 3к9 — 3,9 кОм, 39к — 39 кОм, М39 — 0,39 МОм, 3М9 — 3,9 МОм, 39М — 39 МОм.

Для обозначения значений миниатюрных резисторов иногда используют т. н. **цветовой код.** Он состоит из четырех цветных колец или точек, нанесенных на одном конце корпуса (рис. 6.4). Цвет первого кольца показывает первую цифру значения резистора, второго — вторую цифру, третьего — число нулей после первых двух цифр, цвет четвертого кольца обозначает допустимое отклонение (допуск). Значение цветов дано в таблице 6.2.

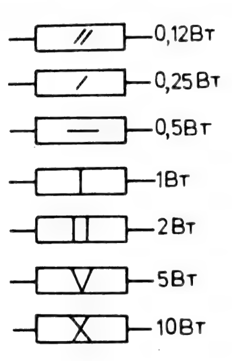
Пример 6.1. Найти значение и класс точности резистора, если последовательность колец слева направо следующая: желтый, фиолетовый, оранжевый, серебристый.

Из таблицы 6.2 находим: первая цифра 4, вторая 7, число нулей — 3, допустимое отклонение 10%. Следовательно, можем сказать, что это резистор 47 кОм, 10%.

6.5. Мощность резисторов

Кроме значения резистора, важным параметром его является **максимальная мощность рассеивания**. Это наибольшая мощность, которую резистор может излучать (или рассеивать) в виде тепла, не перегреваясь. Эта мощность *завист от вида и размеров резистора*. Наиболее употребляемые резис-

Рис. 6.5. Сокращенные обозначения мощности резисторов



торы имеют мощност 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5 и 10 Вт. В радиосхемах мощность резисторов сокращенно обозначается так, как это показано на рис. 6.5.

Мощность резисторов часто вообще не наносится на их корпус. Однако опытный радиолюбитель может оценить эту мощность *по размерам* и внешнему виду резистора.

На практике очень важно, чтобы *электрическая мощность, которую рассеивает резистор, была меньше или, в крайнем случае, равна максимальной мощности рассеивания*. Например, если данный резистор имеет мощность 1 Вт, то мы можем подавать на него различные мощности — 0,1; 0,5; 1 Вт, но ни в коем случае не 1,1; 1,6; 3,4 Вт и т. д., т. к. он может перегреться и прийти в негодность.

Подаваемая на резистор электрическая мощность зависит от приложенного напряжения (или протекающего тока) и вычисляется по формуле (4.5).

Пример 6.2. Какое наибольшее напряжение можно подать на концы резистора, если $R=100$ кОм и $P=1$ Вт?

Задачу можно решить, используя формулу (4.5):

$$U=\sqrt{P.R}=\sqrt{1.100\,000}\approx 315 \text{ В}.$$

Эту задачу можно решить еще проще и быстрее, если использовать соответствующую номограмму.

Рассмотрим это подробнее.

6.6. Логарифмический масштаб. Представление числа в степени. Номограммы

Когда на данном чертеже надо изобразить как малые, так и более крупные значения, обычный (линейный) масштаб неудобен и поэтому используют **логарифмический масштаб.** Например, нам надо построить график, на который нанесены сопротивления от 1 Ом до 1 МОм. Если в этом случае использовать линейный масштаб (рис. 6.6*а*), то значения от 1 Ом до 100 кОм будут нанесены очень густо. Если мы попытаемся расположить их пореже, то нам не хватит места (рис. 6.6*б*). Вот здесь на помощь и приходит логарифмический масштаб, при котором в начале шкалы значения разрежены, а на конце сгущены (рис. 6.6*в*). Таким образом получается бóльшая наглядность между малыми и большими значениями.

При вычислениях с очень малыми и очень большими величинами удобно использовать **представление величин с помощью числа 10 в степени** (см. табл. 6.3). Так, большие величины можно представить в виде

$$150=1{,}5\,.\,10^{2};$$
$$7\,200=7{,}2\,.\,10^{3};$$
$$1\,600\,000=1{,}6\,.\,10^{6}.$$

Рис. 6.6 Линейный и логарифмический масштаб

Таблица 6.3

$10^0 = 1$	$10^{-1} = 0,1$
$10^1 = 10$	$10^{-2} = 0,01$
$10^2 = 100$	$10^{-3} = 0,001$
$10^3 = 1000$	$10^{-4} = 0,0001$
$10^4 = 10000$	$10^{-5} = 0,00001$
$10^5 = 100000$	$10^{-6} = 0,000001$
$10^6 = 1000000$	.
.	.
.	.
.	.
$10^n = 1\underbrace{000 \ldots 000}_{n}$	$10^{-n} = 0,\underbrace{000 \ldots 000}_{n}1$

Аналогично можно представить и малые величины

$0,03 = 3 \cdot 10^{-2}$;
$0,0081 = 8,1 \cdot 10^{-3}$;
$0,0000027 = 2,7 \cdot 10^{-6}$.

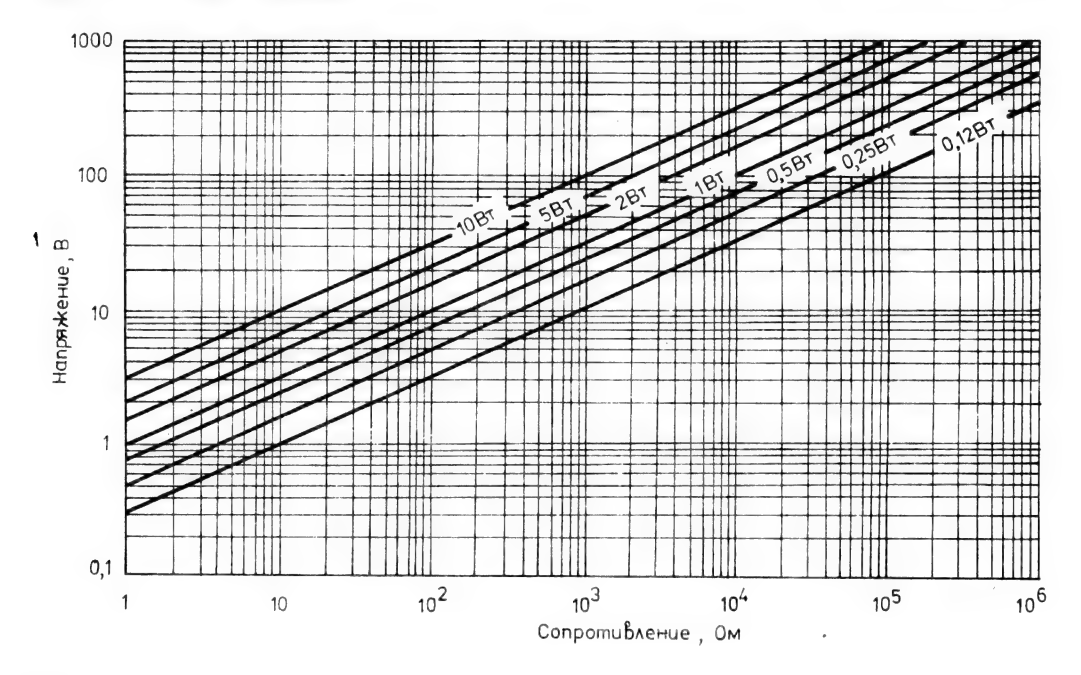
Представление величин с помощью числа 10 в степени особенно удобно при использовании формул, в которых, как мы уже знаем, величины должны быть подставлены *в основных единицах*: вольт, ампер, ом, фарада, метр и т. д. При приведении величин к основным единицам рекомендуем использовать табл. 6.4, в которой даны различные приставки.

Так, например, используя эту таблицу, мы можем написать
372 мм $= 372 \cdot 10^{-3}$ м;
0,17 см $= 0,17 \cdot 10^{-2}$ м;

Таблица 6.4.

Наименование приставки	Множитель	Обозначение
Тера	10^{12}	Т
Гига	10^9	Г
Мега	10^6	М
Кило	10^3	к
Гекто	10^2	г
Дека	10	да
Деци	10^{-1}	д
Санти	10^{-2}	с
Милли	10^{-3}	м
Микро	10^{-6}	мк
Нано	10^{-9}	н
Пико	10^{-12}	п

Рис. 6.7. Номограмма, связывающая сопротивление резисторов, их максимальную мощность и максимально допустимое напряжение



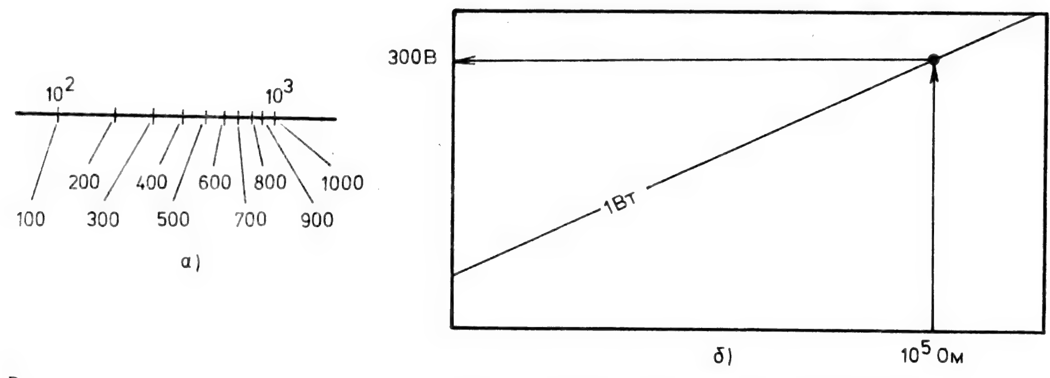


Рис. 6.8. *а*) отсчет в логарифмическом масштабе; *б*) пример использования номограммы

1,4 км $= 1{,}4 \cdot 10^{3}$ м;
27 кОм $= 27 \cdot 10^{3}$ Ом;
0,5 МОм $= 0{,}5 \cdot 10^{6}$ Ом;
13 мА $= 13 \cdot 10^{-3}$ А;
22 мкА $= 22 \cdot 10^{-6}$ А;
3,5 МГц $= 3{,}5 \cdot 10^{6}$ Гц;
712 кГц $= 712 \cdot 10^{3}$ Гц;
68 пФ $= 68 \cdot 10^{-12}$ Ф;
22 нФ $= 22 \cdot 10^{-9}$ Ф;
0,1 мкФ $= 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ Ф.

В радиоэлектронике очень часто используют номограммы. Они графически выражают зависимости между несколькими величинами. Поэтому при использовании номограмм можно решать ряд задач и без помощи формул. В качестве примера на рис. 6.7 дана номограмма, соответствующая формуле $U = \sqrt{P \cdot R}$. С помощью этой номограммы можно легко и быстро решить задачу из примера 6.2. Обращаем внимание, что по оси абсциссы нанесены значения сопротивления, а по

Рис. 6.9. Номограмма, связывающая сопротивление резисторов, их максимальную мощность и максимально допустимый ток

оси ординаты — напряжения, и при этом использован логарифмический масштаб. Для тех читателей, которые не работали с логарифмическим масштабом, на рис. 6.8*а* показано, как определяются величины между числами 100 и 1000. Более взыскательным читателям рекомендуем решить задачу из примера 6.2, используя номограмму рис. 6.7 и указание, данное на рис. 6.8*б*.

Поскольку в дальнейшем часто будут использоваться номограммы, решим еще одну задачу.

Пример 6.3. Какой начальный ток является допустимым для резистора $R=200$ кОм и $P=0,5$ Вт?

Из номограммы, данной на рис. 6.9 (она соответствует формуле $I=\sqrt{\frac{P}{R}}$), находим $I=50$ мА.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **В активных сопротивлениях электроэнергия целиком превращается в другие виды энергии, например, тепловую, механическую, световую, звуковую и т. д.**
2. **При протекании переменного тока через активное сопротивление напряжение и ток находятся в фазе.**
3. **Основными параметрами резисторов являются: значение стандартизованное, допустимое отклонение (класс точности) и максимальная мощность рассеивания.**
4. **Электрическая мощность, подаваемая на данный резистор, всегда должна быть меньше или, в крайнем случае, равна максимальной мощности, которую он может рассеять.**

7 Соединение сопротивлений

Реостат. Потенциометр

7.1. Общие сведения

Радиоэлектронные устройства состоят из большого числа деталей, соединенных между собой различными сложными способами. Однако почти все сложные соединения можно свести к двум видам соединения элементов: последовательному и параллельному.

7.2. Последовательное соединение сопротивлений

При последовательном соединении (рис. 7.1) *общее сопротивление равно сумме отдельных элементов*. Математически это выражается так:

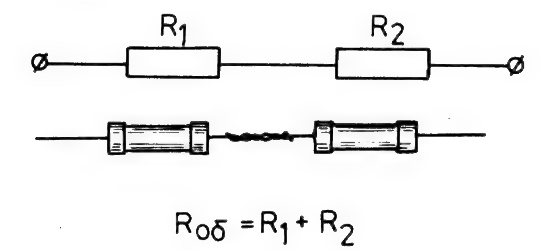
$$R_{об} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots \qquad (7.1)$$

Например, если соединим два сопротивления $R_1 = 510$ Ом и $R_2 = 430$ Ом, то общее сопротивление будет

$$R_{об} = R_1 + R_2 = 510 + 430 = 940 \text{ Ом}.$$

Последовательное соединение характеризуется тем, что *через отдельные сопротивления протекает один и тот же ток*. Поэтому *падения напряжений пропорциональны определенным сопротивлениям*.

Рис. 7.1. Последовательное соединение сопротивлений



Пример 7.1. К двум последовательно соединенным сопротивлениям $R_1 = 3$ кОм и $R_2 = 7$ кОм приложено напряжение $U = 10$ В (рис. 7.2*а*). Определить ток в цепи и падения напряжений на концах сопротивлений.

Сначала находим общее сопротивление

$$R_{об} = R_1 + R_2 = 3000 + 7000 = 10\,000 \text{ Ом}.$$

Потом находим ток в цепи

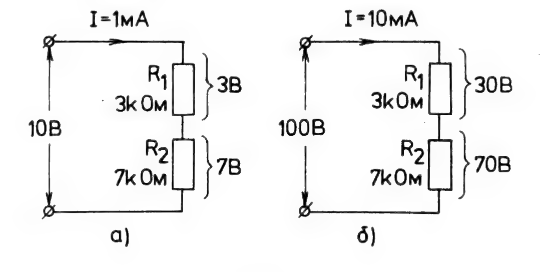
$$I = \frac{U}{R_{об}} = \frac{10}{10000} = 0{,}001 \text{ А}.$$

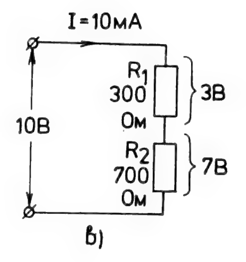
И, наконец, определяем искомые падения напряжений

$$U_{R1} = I \,.\, R_1 = 0{,}001 \,.\, 3000 = 3 \text{ В}.$$
$$U_{R2} = I \,.\, R_2 = 0{,}001 \,.\, 7000 = 7 \text{ В}.$$

На рис. 7.2*б* и *в* приведены еще два

Рис. 7.2. Свойства делителя





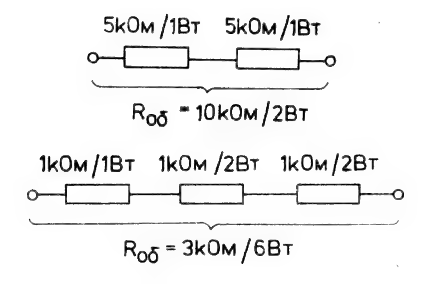


Рис. 7.3. При последовательном соединении одинаковых резисторов суммируется не только сопротивление, но и мощность

примера, которые рекомендуем читателям внимательно проанализировать.

При последовательном соединении *одинаковых по величине и мощности резисторов их мощности суммируются* (рис. 7.3). Таким образом, из нескольких одинаковых резисторов можем получить общий резистор бóльшей мощности рассеивания. При последовательном соединении неодинаковых резисторов на наиболее высокоомном резисторе выделяется наибольшая мощность.

7.3. Параллельное соединение сопротивлений

При параллельном соединении (рис. 7.4) *общее сопротивление меньше наименьшего из сопротивлений и находится по формуле*

$$\frac{1}{R_{об}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\ \dots \qquad (7.2)$$

Если соединены только два сопротивления, то формула приобретает вид:

$$R_{об}=\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1+R_2}. \qquad (7.3)$$

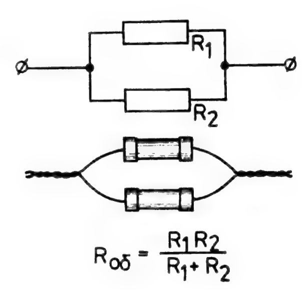
Пример 7.2. Два сопротивления $R_1=30$ Ом и $R_2=70$ Ом соединены параллельно. Найти общее сопротивление. Подставляем данные в верхнюю формулу:

$$R_{об}=\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1+R_2}=\frac{30+70}{30+70}=21 \text{ Ом}.$$

При двух параллельно соединенных сопротивлениях величину $R_{об}$ можно легко найти при помощи номограммы, данной на рис. 7.6. Например, если $R_1=750$ Ом и $R_2=500$ Ом, легко определяется $R_{об}=300$ Ом. Таким же способом если $R_1=750$ кОм и $R_2=500$ кОм, то $R_{об}=300$ кОм.

Если *два одинаковых сопротивления* соединены параллельно, то общее сопротивление равно половине величины одного из них.

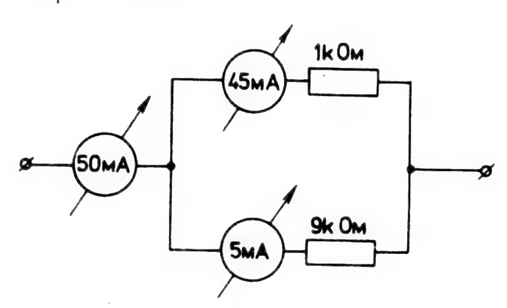
Рис. 7.4. Параллельное соединение сопротивлений



Например, если $R_1=1000$ Ом и $R_2=1000$ Ом, то $R_{об}=500$ Ом.

Параллельное соединение характеризуется тем, что ток, протекающий через отдельные сопротивления, *обратно пропорционален их значениям*. Это хорошо видно на примере, показанном на рис. 7.5.

Рис. 7.5. Свойства параллельно соединенных сопротивлений



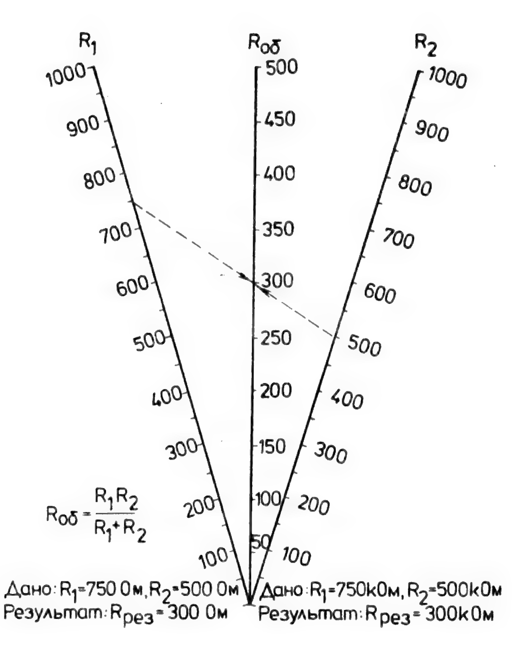
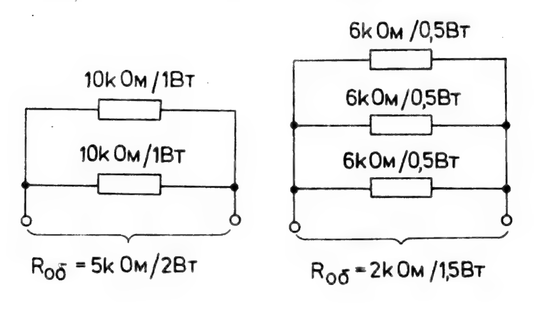


Рис. 7.6. Использование номограммы, предназначенной для двух параллельно соединенных сопротивлений

При параллельном соединении *одинаковых по значению и мощности резисторов их мощности суммируются* (рис. 7.7). Таким образом из нескольких одинаковых резисторов можем получить общий резистор с бóльшей мощностью рассеивания.

При параллельном соединении неодинаковых резисторов в наиболее высокоомном резисторе выделяется наибольшая мощность.

Рис. 7.7. При параллельном соединении одинаковых резисторов их общее сопротивление уменьшается, но мощность суммируется



7.4. Реостат

Реостат представляет собой резистор, значение которого может плавно изменяться. Обычно это керамический корпус, на который намотан проводник, и по этой намотке скользит контакт (рис. 7.8*а*). K_1 и K_2 — начало и конец проводника, а *П* — скользящий кон-

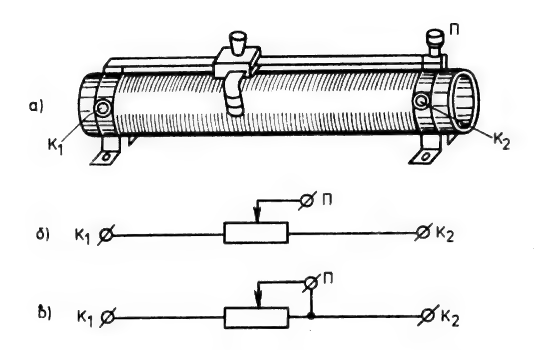


Рис. 7.8. *а*) лабораторный реостат; *б*) при подключении трех концов реостата к различным точкам электрической цепи он используется в качестве потенциометра; *в*) при соединении скользящего контакта с одним из концов реостата, реостат используется как переменное сопротивление

такт. Если все три вывода реостата подсоединены к различным точкам электрической цепи, то говорят, что реостат используется в качестве потенциометра (см. рис. 7.8 *б*).

Если скользящий контакт соединен с одним из выводов реостата (рис. 7.8 *в*), то реостат представляет собой переменное сопротивление.

Реостаты используются в тех цепях, где необходимо плавное изменение сопротивления от нуля до какой-нибудь определенной величины. Основные параметры любого реостата — максимальное сопротивление $R_{макс}$ и максимальная мощность рассеивания $P_{макс}$. Обычно эти значения нанесены на корпус реостата.

7.5. Делитель напряжения

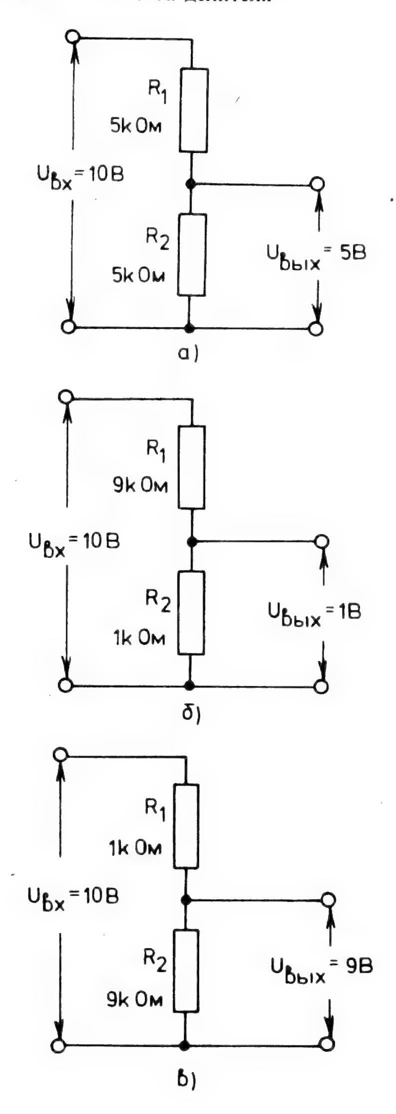
На рис. 7.9 показаны схемы делителей

напряжения. Во всех трех случаях входное напряжение 10 В, а входное сопротивление 10 кОм. Однако выходное сопротивление и выходное напряжение различны и обусловлены подбором сопротивлений R_1 и R_2. Основная зависимость в делителях напряжения следующая:

$$\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \qquad (7.4)$$

Основным свойством любого делителя является то, что при соответствующем подборе R_1 и R_2 выходное напряжение может представлять собой какую-то часть входного.

Рис. 7.9. Свойства делителя



Обратите внимание, что отношение $U_{вых}$ и $U_{вх}$ зависит не от абсолютного значения величин R_1 и R_2, а только от их *отношения*. Например, если на рис. 7.9 *б* вместо 9 и 1 кОм будет 18 и 2 кОм (или 27 и 3 кОм), выходное напряжение не изменится.

7.6. Потенциометр

Потенциометр — переменный резистор со скользящим контактом, имеющий три вывода. На рис. 7.10 показан графитный потенциометр. При вращении оси скользящий контакт движется по изоляционной шайбе, покрытой слоем графита. Подобную конструкцию имеют проволочные потенциометры, только в них на изоляционную

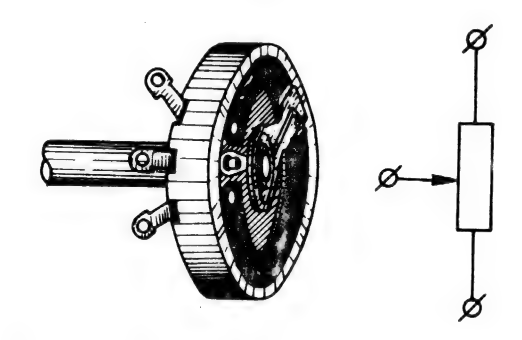


Рис. 7.10. Потенциометр

шайбу намотана проволока с большим сопротивлением.

Из рис. 7.11 видно, что, в сущности, *потенциометр является делителем напряжения, у которого соотношение между R_1 и R_2 может изменяться плавно.* В результате вращением оси можно плавно изменять выходное напряжение от нуля до $U_{вх}$.

Различаем *линейные и логарифмические* потенциометры. В линейных потенциометрах сопротивление различных участков графитного слоя одно и то же, а в логарифмических — различное (рис. 7.12).

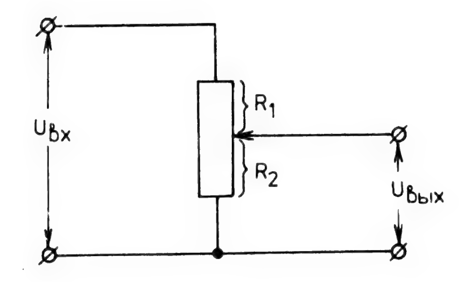


Рис. 7.11. При движении скользящего контакта изменяется соотношение между R_1 и R_2

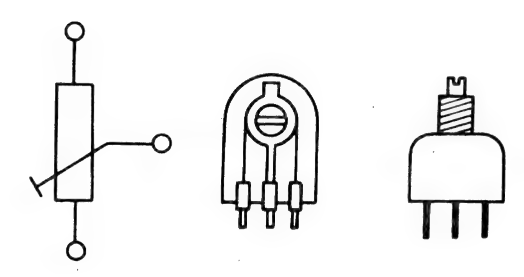


Рис. 7.13. Триммеры и их обозначение

Основные параметры любого потенциометра — максимальное сопротивление $R_{\text{макс}}$ и максимальная мощность рассеивания $P_{\text{макс}}$. Обычно максимальные значения потенциометров стандартизованы в соответствии с таблицей 7.1. Проволочные потенциометры в принципе *предназначены для больших токов*, и их значения редко превышают 50 кОм. Графитные потенциометры могут *пропускать преимущественно малые токи*, а их значения достигают 5 МОм.

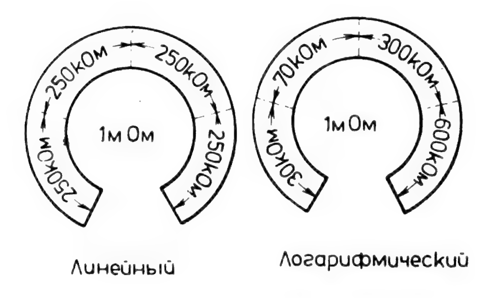


Рис. 7.12. Виды потенциометров

Пример 7.3. Какой наибольший ток является допустимым для графитного потенциометра значением 1 МОм и мощностью 1 Вт?

Из номограммы, данной на рис. 6.9, можем найти, что наибольший допустимый ток для этого потенциометра 1 мА.

В радиоэлектронике находят применение т. н. **триммерпотенциометры** (рис. 7.13). Они предназначны для подстройки различных электрических цепей. Их сопротивление изменяется с помощью отвертки, и это делается только при производстве и ремонте аппаратуры.

В заключение можно сказать, что любой потенциометр можно использовать и в качестве реостата (см. рис. 7.8).

ЗАПОМНИТЕ!

1. **При последовательном соединении общее сопротивление равно сумме отдельных сопротивлений.**
2. **При последовательном соединении ток, протекающий через отдельные сопротивления, один и тот же.**
3. **При последовательном соединении падения напряжений пропорциональны отдельным сопротивлениям, т. е. на наибольшем сопротивлении образуется наибольшее падение напряжения.**
4. **При параллельном соединении общее сопротивление меньше наименьшего из сопротивлений.**
5. **При параллельном соединении на отдельных сопротивлениях действует одно и то же напряжение.**

6. **При параллельном соединении токи обратно пропорциональны отдельным сопротивлениям, т. е. по наименьшему сопротивлению протекает наибольший ток.**
7. **Реостат — это переменный резистор с двумя выводами, сопротивление которого можно изменять плавно.**
8. **Потенциометр — это переменный резистор с тремя выводами. Средний вывод связан со скользящим контактом, поэтому потенциометр представляет собой переменный делитель напряжения.**

---

8 Электрическая емкость и конденсаторы

8.1. Электрическая емкость

На рис. 8.1 *а* показана *плотная* металлическая сфера, заряженная отрицательно. (Для простоты нарисованы только дополнительно внесенные электроны.) Благодаря взаимному отталкиванию электронов они располагаются равномерно по поверхности сферы, а внутри сфера остается нейтральной. Если этим же зарядом (этим же количеством электронов) наэлектризовать другую металлическую сферу большего размера, то электроны расположатся опять на ее поверхности, но дальше друг от друга (рис. 8.1 *б*). В таком случае говорят, что *электрическая емкость второй сферы больше*. И действительно, для того, чтобы получить ту же самую плотность частиц, надо добавить к сфере еще электронов.

Теперь ясно, что *металлические тела бóльших размеров имеют бóльшую*

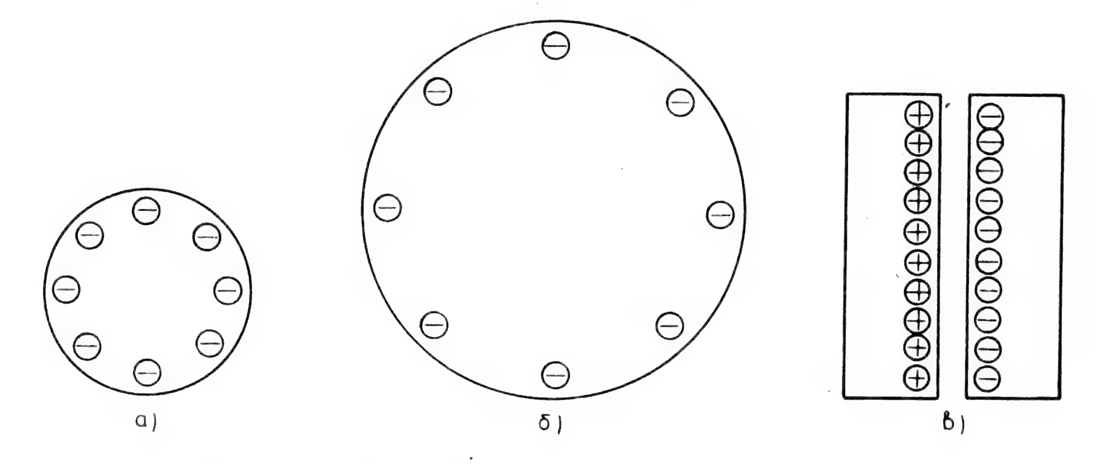


Рис. 8.1. *а)* при зарядке металлической сферы отрицательными зарядами они взаимно отталкиваются и располагаются на ее поверхности; *б)* при увеличении размеров сферы явление то же самое, но электроны располагаются дальше друг от друга, то есть емкость второй сферы больше; *в)* при двух разноименно заряженных металлических телах электрические заряды взаимно притягиваются

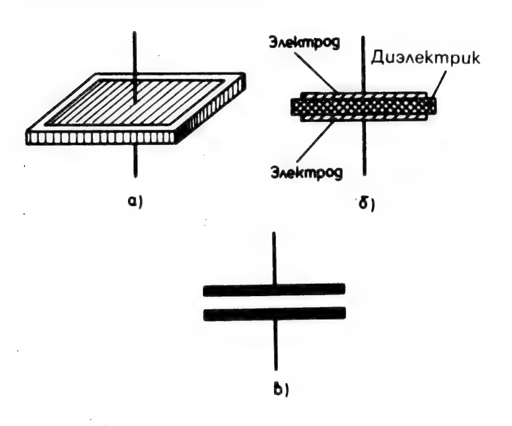
электрическую емкость. Однако емкость любой системы можно увеличить не только за счет увеличения ее размеров, но и другими способами. Это показано на рис. 8.1 *в*, где два одинаковых металлических тела, заряженных разноименными зарядами, помещены близко друг к другу. Благодаря *взаимному притяжению* заряды располагаются более густо на *обращенных друг к другу сторонах* тел. Так „освобождается место" для введения дополнительных внешних зарядов, т. е. увеличивается емкость. Эта особенность используется в различных видах конденсаторов.

Можно еще добавить, что *любое заряженное тело является носителем определенной энергии*. Эта энергия введена внешней причиной, которая зарядила тело. Аналогичный случай представляет собой надутая автомобильная шина, она — „носитель" энергии, переданной тем, кто надул шину.

8.2. Общие сведения о конденсаторах

Система, состоящая из двух проводников, разделенных диэлектриком, называется конденсатором (рис. 8.2). Главным свойством конденсатора является то, что на его обкладках (электродах) могут накапливаться *равные по величине и противоположные по знаку* электрические заряды. Другим важным свойством конденсатора является его *способность пропускать переменный ток и не пропускать постоянный.* (В дальнейшем рассмотрим это подробнее).

Рис. 8.2. *а*) и *б*) устройство конденсатора; *в*) обозначение конденсатора



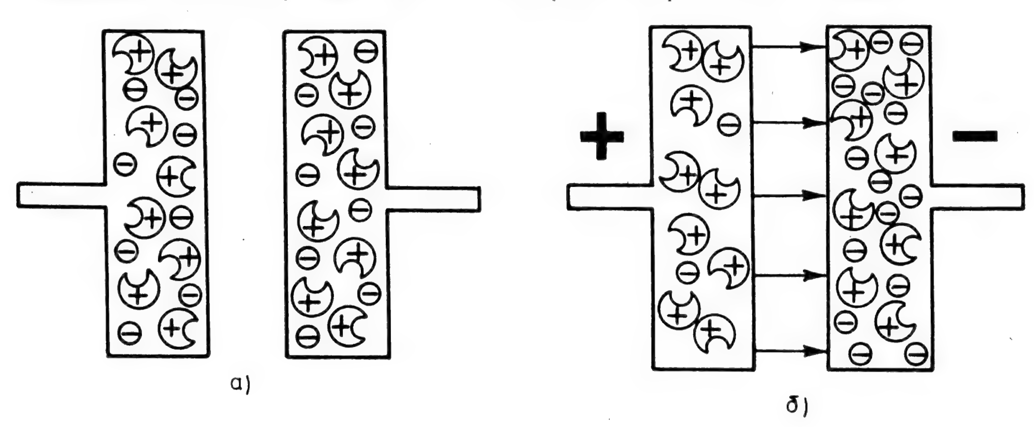
На рис. 8.3*а* схематично показан незаряженный конденсатор, металлические обкладки которого электрически нейтральны, потому что число положительных и отрицательных частиц на каждом электроде одинаково и они взаимно нейтрализуются.

В заряженном конденсаторе *положительному электроду (обкладке) недостает свободных электронов, а отрицательный имеет избыток* (рис. 8.3*б*). В этом случае *между обкладками заряженного конденсатора существует определенное напряжение, а в диэлектрике возникает электрическое поле.*

Напряжение между обкладками, которое возникает при зарядке конденсатора, зависит как от количества электричества, так и от емкости конденсатора. Если два конденсатора различной емкости зарядить *одним и тем же количеством электричества*, то напряжение на меньшем конденсаторе будет выше напряжения на бóльшем. Подобный случай представляют два различных по величине сосуда, в которые налито *одинаковое количество воды.* Очевидно, уровень воды в меньшем сосуде будет выше уровня в большем (рис. 8.4).

Единица измерения электрической емкости называется **фарада (Ф)** в честь английского физика **Майкла Фарадея** (1791—1867). *Конденсатор имеет емкость 1 фараду, если при зарядке его одним кулоном электричества полу-*

Рис. 8.3 *а)* в незаряженном конденсаторе каждая из его обкладок нейтральна; *б)* положительная обкладка заряженного конденсатора имеет недостаток электронов, а отрицательная — избыток



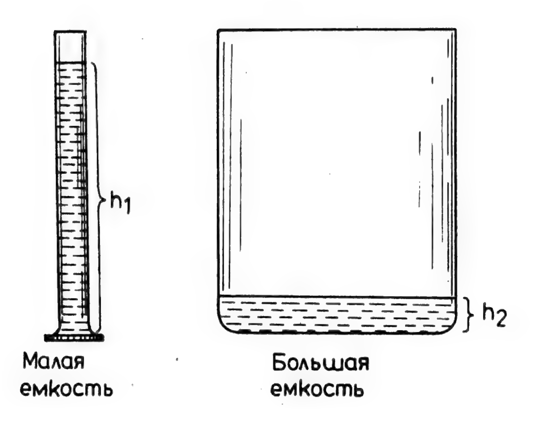


Рис. 8.4. Одно и то же количество воды, налитой в различные сосуды, создает различное давление

чаем между обкладками напряжение один вольт.

Следовательно, можно записать:

$$1\ \text{фарада} = \frac{1\ \text{кулон}}{1\ \text{вольт}}.$$

Поскольку емкость обозначается буквой C, количество электричества — Q, а напряжение U, получим такую формулу:

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (8.1)$$

Эта формула определяет связь между емкостью конденсатора, количеством электричества, которым заряжен конденсатор, и напряжением, возникающим между его электродами.

Конденсатор емкостью 1 Ф имел бы очень большие размеры. Поэтому *применяемые на практике конденсаторы имеют значительно меньшую емкость,* для измерения которой используются единицы **микрофарада (мкФ), нанофарада (нФ) и пикофарада (пФ)**. Эти единицы могут быть представлены в таком виде.

1 мкф $= 10^{-6}$ Ф;
1 нФ $= 10^{-9}$ Ф;
1 пФ $= 10^{-12}$ Ф.

Отсюда видно, что 1 мкФ= 1000 нФ, а 1 нф=1000 пФ.

Пример 8.1. Какое напряжение возникнет между обкладками конденсатора емкостью 20 мкФ, если зарядить его зарядом в 0,001 кулона?

Используя формулу (8.1), находим:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{10^{-3}}{20 \,.\, 10^{-6}} = \frac{10^{3}}{20} = 50\ \text{В}.$$

Если тем же количеством электричества зарядим конденсатор емкостью 1 пФ, то между его обкладками возникнет напряжение 1 миллион вольт!

Выше мы выяснили, что емкость зависит как от размеров конденсатора, так и от условий для взаимного притяжения противоположных по знаку зарядов. *С увеличением площади обкладок увеличивается и емкость конденсатора*, потому что создаются условия для накопления большего количества зарядов. Однако этот способ увеличения емкости приводит к увеличению размеров самого конденсатора, а это нежелательно.

Другим способом увеличения емкости данного конденсатора является *уменьшение расстояния между его обкладками.* В результате разноименные заряды оказываются ближе друг к другу, электрическое поле между обкладками становится более интенсивным и силы притяжения между зарядами увеличиваются. Таким образом, на каждой обкладке заряды скапливаются более густо и освобождают место для других зарядов, т. е. емкость увеличивается. Но сближать обкладки можно только до определенного предела, после чего значительно увеличивается опасность короткого замыкания или пробоя.

8.3. Роль диэлектрика

Наиболее рациональный способ увеличения емкости конденсатора — это помещение *подходящего диэлектрика* между его обкладками. Рассмотрим это подробнее.

В нормальном состоянии валентные электроны любого диэлектрика

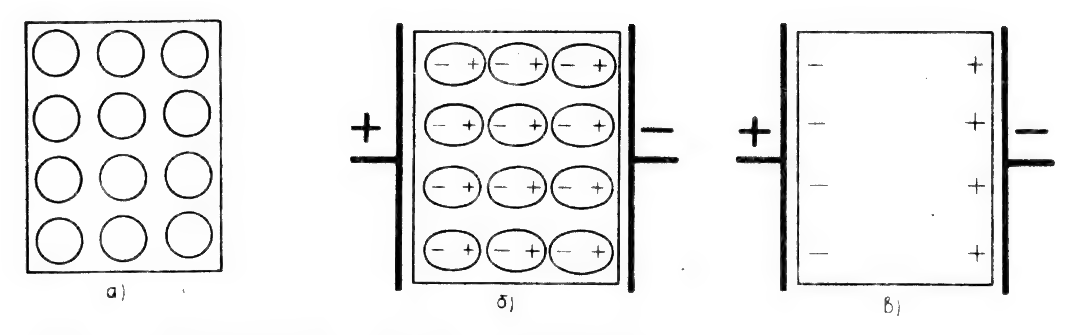
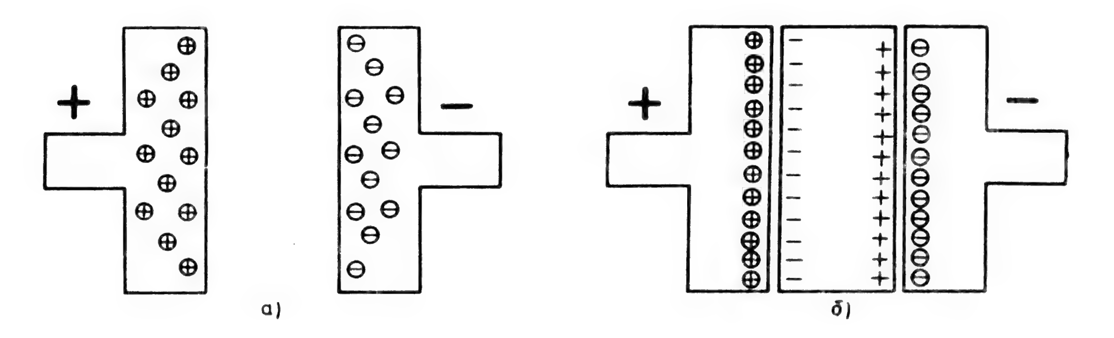


Рис. 8.5. *а*) неполяризованный диэлектрик; *б*) поляризованный диэлектрик; *в*) на противоположных поверхностях поляризованного диэлектрика создаются фиктивные заряды

вращаются вокруг атомного ядра по круговым орбитам (последние показаны символично на рис. 8.5*а*). При помещении диэлектрика в электрическое поле, оно действует на вращающиеся электроны и *деформирует их орбиты*. В результате этого молекулы диэлектрика превращаются в **диполи**, т. е. в частицы, которые на своих противоположных концах заряжаются разноименно (рис. 8.5*б*). Находящиеся внутри диэлектрика разноименные заряды взаимно нейтрализуются, а заряды на его двух противоположных сторонах остаются нескомпенсированными, т. е. их можно рассматривать как *фиктивные* (несвободные, связанные с веществом) заряды, расположенные на поверхности диэлектрика (рис. 8.5*в*). Это явление называется **поляризацией** диэлектрика. Чем больше фиктивных зарядов образуется на поверхности диэлектрика, тем более он поляризуется.

На рис. 8.6*а* показан заряженный конденсатор, между обкладками которого есть вакуум (свободное пространство). Как уже нам известно, емкость такого конденсатора зависит от площади обкладок и расстояния между ними. Следует отметить, что здесь заряды на каждой из обкладок не расположены особенно плотно друг к другу. Это получается потому, что расстояние между двумя обкладками довольно большое и силы взаимного притяжения между зарядами не особенно велики. На рис. 8.6*б* между электродами такого же заряженного конденсатора помещен диэлектрик. Вследствие возникшей поляризации фиктивные заряды на поверхности диэлектрика *оказываются очень близко к зарядам на обкладках*, и поэтому силы взаимного притяжения более значительны. Таким образом, заряды на обкладках скапливаются гуще и освобождают место для других зарядов

Рис. 8.6. *а*) кондесатор, у которого диэлектриком является вакуум; *б*) конденсатор с обыкновенным диэлектриком



(рис. 8.6*б*), т. е. емкость конденсатора увеличивается.

Очевидно, чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем значительнее увеличивается емкость конденсатора.

В количественном отношении степень поляризации характеризуется величиной ε_r, которая называется **относительной диэлектрической проницаемостью** вещества. Для различных диэлектриков эта величина различна (например, для стекла $\varepsilon_r = 3 \div 12$, для слюды $\varepsilon_r = 6 \div 8$, а для воздуха $\varepsilon_r = 1$ и т. д.) и дается в справочниках. Большинство наиболее применяемых диэлектриков имеют ε_r в пределах от 1 до 20. Существует, однако, особая группа веществ, называемых сегнетоэлектриками, у которых поляризация чрезвычайно сильна и $\varepsilon_r = 50 \div 100\,000$. Сегнетоэлектрики используются для изготовления *миниатюрных конденсаторов, обладающих относительно большой емкостью.*

В заключение следует добавить, что диэлектрики, используемые для изготовления конденсаторов, должны обладать не только большим значением относительной диэлектрической проницаемости, но и удовлетворять следующие условия:

а) *иметь большую электрическую прочность*, т. е. тонкий слой диэлектрика должен выдерживать значительные напряжения, чтобы не наступил пробой;

б) *иметь небольшие потери на высоких частотах*. Когда между обкладками конденсатора действуют переменные напряжения, они вызывают циклическую переориентацию молекул диэлектрика, что, со своей стороны, приводит к его нагреву, а это является излишней потерей энергии. Хорошие диэлектрики на высоких частотах нагреваются сравнительно слабо. Таковы, например, полистирол, специальная керамика и т. д.

8.4. Емкость плоского конденсатора

В предыдущих параграфах мы выяснили, что чем больше площадь обкладок, чем меньше расстояние между ними и чем больше диэлектрическая проницаемость используемого диэлектрика, тем больше емкость данного конденсатора. Емкость плоского конденсатора с одинаковыми обкладками вычисляется по формуле:

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\varepsilon_r S}{d}. \qquad (8.2)$$

Здесь ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, S — площадь одной из обкладок в м^2, а d — расстояние между обкладками в метрах.

Пример 8.2. Найти емкость плоского конденсатора, если $S = 100$ см^2, $d = 1$ мм, а диэлектрик — вощеная бумага с $\varepsilon_r = 4$.

Приводим величины к основным единицам и подставляем в верхнюю формулу

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\varepsilon_r S}{d} = 8{,}85.10^{-12} \frac{4.10^{-2}}{10^{-3}} =$$

$$354 \cdot 10^{-12}\ \text{Ф} = 354\ \text{пФ}$$

Учитывая вышесказанное, можем дать следующее физическое объяснение величины ε_r: относительная диэлектрическая проницаемость данного диэлектрика — это число, которое показывает, во сколько раз возрастает емкость данного плоского вакуумного конденсатора, если вместо вакуума использовать данный диэлектрик.

8.5. Конденсатор в цепи постоянного тока

На рис. 8.7 показана электрическая цепь, состоящая из батарейки, лампочки и конденсатора.

При замыкании цепи лампочка светит короткое время, после чего гаснет,

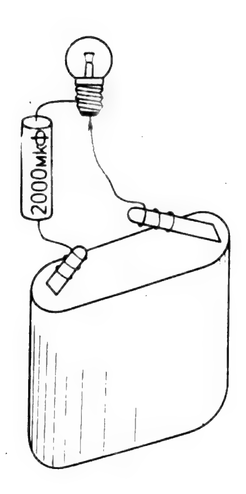


Рис. 8.7. При замыкании цепи лампочка на мгновение загорается

несмотря на то, что цепь замкнута. Поэтому и говорят, что конденсаторы не пропускают постоянный ток.

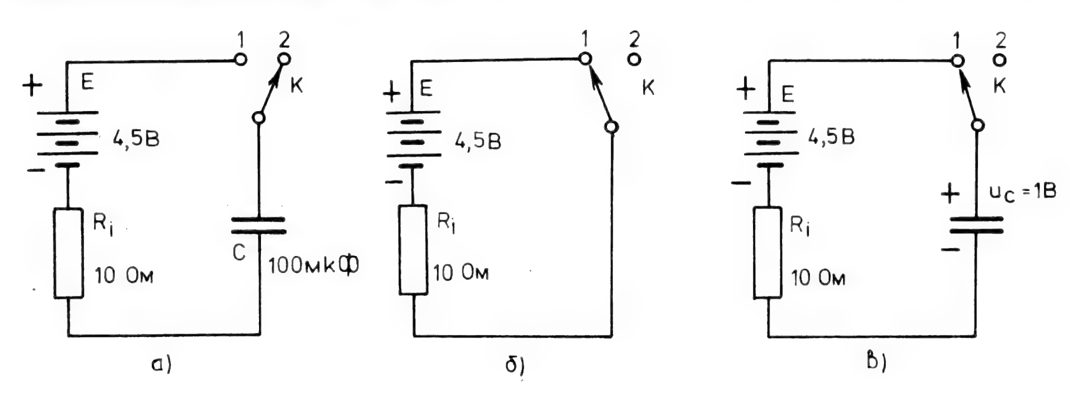
Подобная же схема представлена на рис. 8.8*а*. При замыкании ключа *K* в цепи некоторое время протекает т. н. *зарядный ток*. Он протекает только до тех пор, пока заряжается конденсатор, и это явление называется *переходным процессом*. Зарядка конденсатора не происходит мгновенно, а постепенно по т. н. экспоненциальному закону. В *момент включения* напряжение между обкладками конденсатора равно нулю, т. е. *конденсатор представляет собой короткое замыкание в цепи* (рис. 8.8*б*) и поэтому зарядный ток наибольший. В следующий момент напряжение на конденсаторе начинает увеличиваться, *при этом оно имеет противоположное направление* направлению ЭДС источника. Таким образом, общее напряжение в цепи уменьшается (на рис. 8.8*в* оно равно $U_{об} = 4{,}5 - 1 = 3{,}5$ В), поэтому уменьшается и зарядный ток. На рис. 8.9 показано изменение тока и напряжения в рассматриваемой конкретной схеме. Видно, что переходный процесс продолжается довольно долго. Однако для практических расчетов принимаем, что *переходный процесс кончается тогда, когда напряжение на конденсаторе достигает 95% напряжения источника тока* или когда зарядный ток достигает только 5% тока в первый момент включения. Этим переходный процесс практически заканчивается, т. е. конденсатор заряжен, и ток в цепи больше не протекает.

Продолжительность переходного процесса можно вычислить по формуле

$$t = 3R\ C. \qquad (8.3)$$

Здесь t — время в секундах, C — емкость в фарадах, а R — сопротивление в омах *всей цепи, в которой происходит зарядка*, включая и R_i источника тока. Эта формула показывает, что большая емкость через большое сопротивление заряжается дольше, а малая емкость через малое сопротивление заряжается быстрее.

Рис. 8.8. *а*) при замыкании ключа *K* в цепи протекает зарядный ток; *б*) в первый момент включения всякий конденсатор представляет собой короткое замыкание; *в*) за короткое время после включения конденсатор зарядился до напряжения 1 В



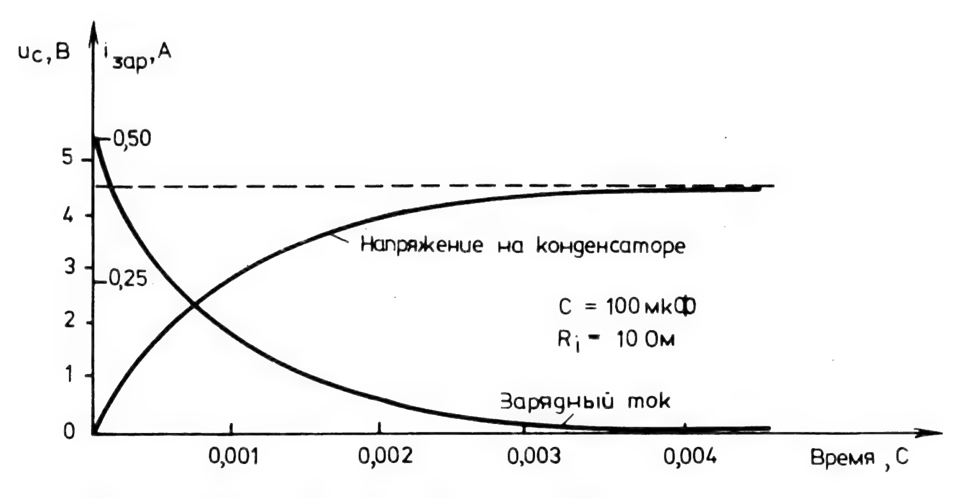


Рис. 8.9. Графики, поясняющие переходный процесс при зарядке конденсатора

Пример 8.3. За какое время зарядится конденсатор емкостью $C=10$ мкФ через сопротивление $R=10$ Ом?

Приводим емкость к основным единицам и подставляем в формулу (8.3) $t=3RC=3\,.\,10\,.\,10^{-6}=0{,}0003$ с.

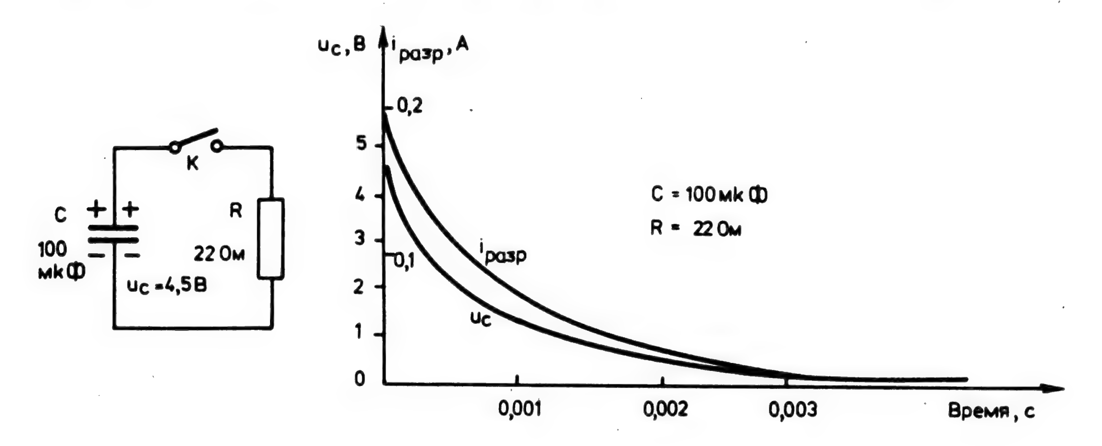
Если бы тот же конденсатор заряжали через сопротивление 1 МОм, то переходный процесс длился бы 30 секунд.

При разрядке конденсатора через сопротивление происходят те же самые явления, т. е. разрядка происходит не мгновенно, а тоже по экспоненциальному закону, а *продолжительность переходного процесса можно найти по формуле*, данной выше. На рис. 8.10 показана схема разрядки конденсатора через сопротивление и график переходного процесса. Видно, что как напряжение, так и ток разряда уменьшается по экспоненте.

8.6. Конденсатор в цепи переменного тока

Как известно, переменный ток в металлах представляет собой колебательное движение электронов то в одном, то в другом направлении. Если к источнику переменного тока подключить конден-

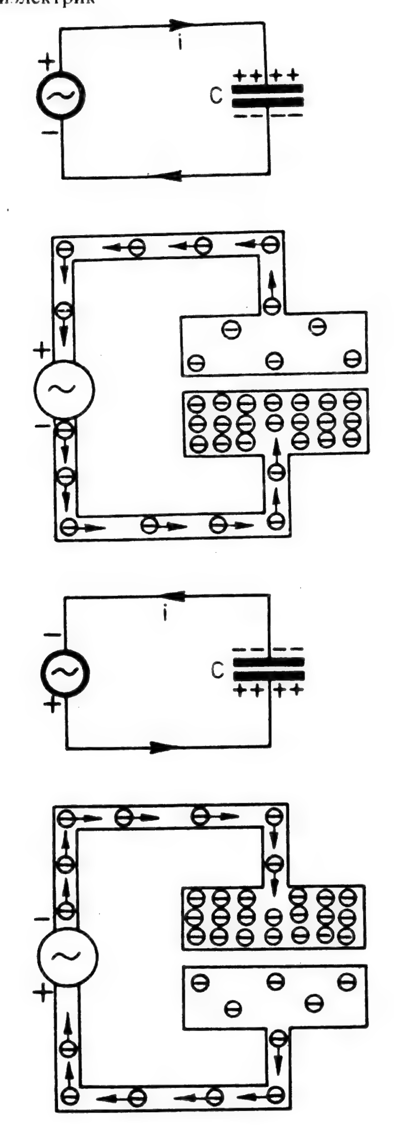
Рис. 8.10. Схема и графики, поясняющие переходный процесс при разрядке конденсатора



сатор, то его обкладки будут периодически заряжаться и разряжаться электронами (рис. 8.11). *Несмотря на то, что электроны не проникают сквозь диэлектрик, во внешней цепи их движение колебательное, т. е. протекает переменный ток.*

Сопротивление, которое конденсатор оказывает переменному току, называется емкостным сопротивлением и

Рис. 8.11. При прохождении переменного тока через конденсатор электроны только скапливаются на электродах, но не проходят через диэлектрик



измеряется в омах. Оно обозначается X_C и вычисляется по формуле

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \qquad (8.4)$$

Отсюда следует, что *емкостное сопротивление зависит как от величины емкости конденсатора, так и от частоты.* Чем больше емкость и выше частота, тем меньше емкостное сопротивление.

Пример 8.4. Найти емкостное сопротивление конденсатора емкостью 0,1 мкФ при частоте 50 Гц.

Превращаем емкость в фарады и подставляем в формулу (8.4)

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= \frac{10^6}{31{,}4} \approx 32 \text{ кОм}.$$

Этот же конденсатор при частоте 500 Гц будет иметь емкостное сопротивление $X_C = 3200$ Ом, а при частоте 1 МГц — $X_C = 1{,}6$ Ом, т. е. будет представлять собой *почти короткое замыкание для токов высокой частоты.* Зависимость емкостного сопротивления этого конденсатора от частоты (называется еще *частотной хаарактеристикой*) показана на рис. 8.12.

Емкостное сопротивление данного конденсатора можно найти легче и быстрее при помощи номограммы, данной на рис. 8.13. Например, на номограмме легко находим, что при $f = 50$ кГц конденсатор емкостью $C = 1$ нФ имеет емкостное сопротивление $X_C \approx 3$ кОм.

Теперь, когда мы уже знаем, что представляет собой емкостное сопротивление, можем записать закон Ома для переменного тока через конденсаторы

$$U = X_C I, \quad X_C = \frac{U}{I}, \quad I = \frac{U}{X_C}. \qquad (8.5)$$

Пример 8.5. Какой ток протечет в цепи (рис. 8.14), если конденсатор ем-

Рис. 8.12. При увеличении частоты емкостное сопротивление уменьшается

костью $I=8$ мкФ подключить к осветительной сети.

Превращаем микрофарады в фарады и находим емкостное сопротивление конденсатора

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi\ .\ 50\ .\ 8\ .\ 10^{-6}}=$$

$= 400$ Ом.

После чего по закону Ома получаем

$$I=\frac{U}{X_C}=\frac{220}{400}=0{,}55\ \text{А}.$$

Очень часто говорят, что *сопротивление конденсатора реактивно.* Чтобы объяснить это, снова рассмотрим опыт, показанный на рис. 8.14, задав себе вопрос: какова мощность, выделяемая на конденсаторе? На первый взгляд эту мощность можем найти, используя формулу (4.5):
$P=U\ .\ I=220\ .\ 0{,}55=120$ Вт. Но коснувшись конденсатора рукой, установим, что даже и после продолжительной работы он остается холодным, а каждый из нас отвинчивал нагретую

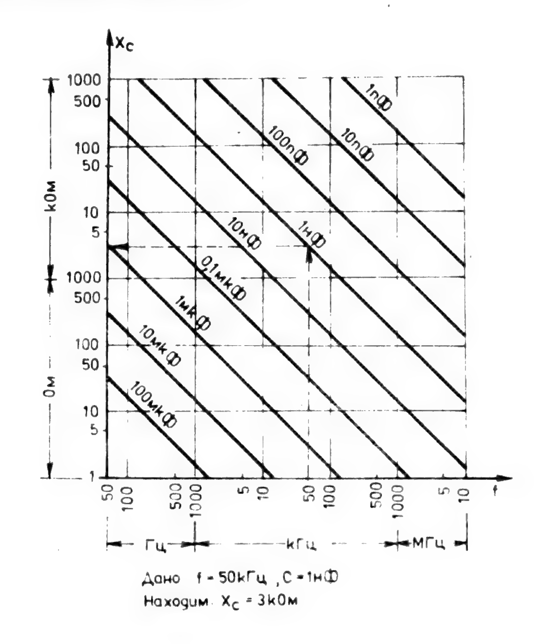


Рис. 8.13. Номограмма для вычисления емкостного сопротивления

электрическую лампочку и знает, какая она горячая! А почему же конденсатор остается холодным?

Причина в том, что конденсатор —

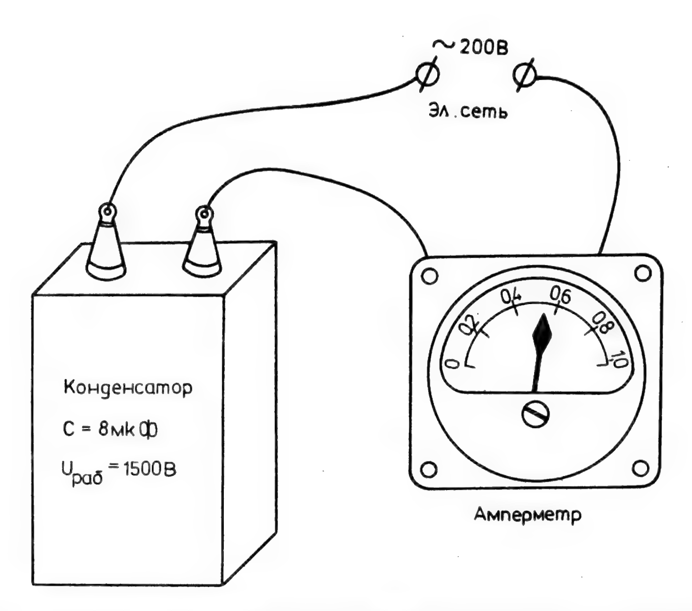
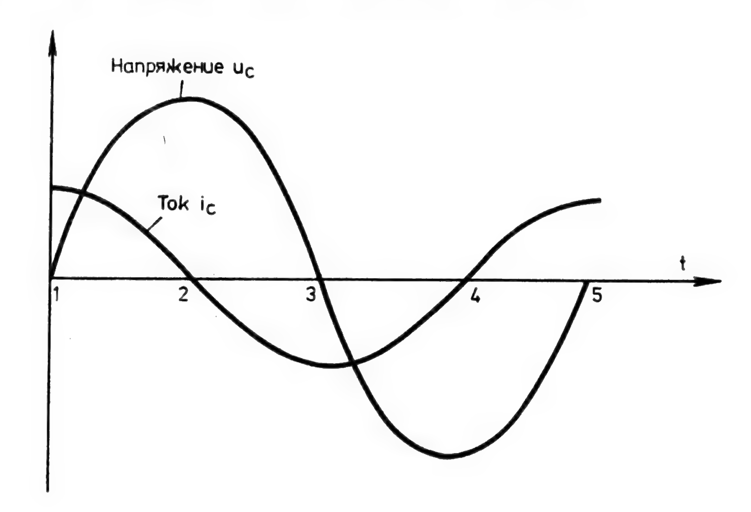


Рис. 8.14. Даже при протекании тока значительной величины конденсатор не нагревается, т. к. имеет реактивное сопротивление

это **реактивное сопротивление**, т. е. в нем *максимум напряжения и тока не наступает одновременно*, как в активном сопротивлении. Чтобы понять это, припомним, как изменяется ток и напряжение при подключении конденсатора к источнику постоянного напряжения. Это было показано на рис. 8.9, где даны графики напряжения и тока. Из этого рисунка видно, что в первый момент включения напряжение между обкладками равно нулю, а ток максимальный. После того, как конденсатор зарядится и его напряжение станет максимальным, ток через конденсатор уменьшится до нуля.

Упомянутая особенность конденсатора проявляется и тогда, когда он подключен к переменному синусоидальному напряжению. Это показано

Рис. 8.15. При емкостном сопротивлении синусоидальное напряжение отстает на 180° от тока



на рис. 8.15. Из этого графика следует, что когда ток максимальный, то напряжение между обкладками конденсатора равно нулю, а когда напряжение максимально, ток через конденсатор равен нулю. Следовательно, *приложенное напряжение и протекающий ток имеют разность фаз 90°, и ток опережает напряжение.*

Поскольку конденсатор — реактивное сопротивление, *мощность в цепи тоже реактивная.* Чтобы выяснить это понятие, вспомним, что мощность — это произведение напряжения и тока (см. формулу (4.5)). Из рис. 8.15 следует, что в первой четверти периода (участок *1—2*) ток и напряжение положительны, т. е. мощность $P = UI$ положительна. Это значит, что за эту часть периода конденсатор заряжается и принимает энергию от электрической сети. Во второй четверти периода (участок *2—3*) напряжение положительно, но ток отрицателен, т. е. мощность отрицательна. Это значит, что в эту часть периода конденсатор разряжается и отдает свою энергию обратно в сеть. Точно так же видно, что в третьей четверти периода (участок *3—4*) напряжение и ток отрицательны, но мощность положительна (конденсатор заряжается), а в четвертой четверти периода (участок *4—5*) напряжение отрицательно, а ток положителен, т. е. мощность отрицательна (конденсатор разряжается). Следовательно, в реактивных сопротивлениях налицо *постоянный обмен энергией* между генератором и конденсатором, при этом *средняя мощность равна нулю,* и именно поэтому конденсатор на рис. 8.14 не нагревается, несмотря на протекающий через него значительный ток.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Конденсатор представляет собой систему из двух проводников, разделенных диэлектриком.**
2. **Единица измерения электрической емкости называется фарада.**
3. **Емкость конденсатора можно увеличить, увеличивая площадь его обкладок, уменьшая расстояние между ними или используя диэлектрик с большой относительной диэлектрической проницаемостью.**
4. **Если пренебречь током заряда, то сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, т. е. конденсатор не пропускает постоянный ток.**
5. **Сопротивление конденсатора переменному току (емкостное сопротивление) зависит как от емкости конденсатора, так и от частоты тока. При бóльшей емкости конденсатор оказывает мéньшее сопротивление переменному току. С увеличением частоты сопротивление данного конденсатора уменьшается.**
6. **Емкостное сопротивление реактивно, т. е. в цепи переменного тока конденсатор непрерывно заряжается и разряжается, так что его средняя мощность, поступающая в конденсатор, равна нулю.**

9 Виды конденсаторов

Соединение конденсаторов

9.1. Основные параметры конденсаторов

Каждый технический конденсатор характеризуется следующими основными параметрами.

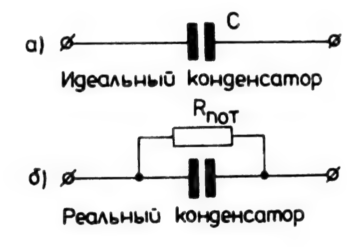
а) Номинальная емкость. Это то значение конденсатора, которое очень часто наносится на его корпус. В радиоэлектронике чаще всего используются конденсаторы емкостью от 1 пФ до 5000 мкФ. Конденсаторы постоянной емкости (за исключением электролитических), как и резисторы, имеют три класса точности, а их номинальные значения соответствуют тому же стандарту (см. табл. 6.1). Так например, как бы мы ни искали, мы не сможем найти конденсатор емкостью 7000 пФ, но вместо него можно использовать конденсатор емкостью 6800 или 7500 пФ. В радиосхемах емкость конденсаторов обозначается сокращенно, как это показано в рис. 9.1.

б) Рабочее напряжение. Это наибольшее напряжение между обкладками конденсатора, которое нельзя превышать во время работы. В противном случае наступит *пробой в диэлектрике*, и конденсатор выйдет из строя. Рабочее напряжение зависит от качества и толщины использованного диэлектрика. Чем толще диэлектрик, тем больше рабочее напряжение, но вместе с тем увеличиваются и размеры конденсатора.

Рис. 9.1. Сокращенное обозначение значения конденсаторов

Обозначение	Значение
C—50	50 пФ
C—100	100 пФ
C—500	500 пФ
C—1n	1000 пФ
C—10n	
C—0,01	10000 пФ
C—15n	
C—0,015	15000 пФ
C—20n	
C—0,02	20000 пФ
C—0,1	0,1 мкФ
C—1,0	1 мкФ
C—4,0	4 мкФ
C—8,0	8 мкФ
C—16,0	16 мкФ
C—20,0	20 мкФ
C—32,0	32 мкФ
C—50,0	50 мкФ
C—100,0	100 мкФ

Рис. 9.2. Эквивалентные схемы: *а*) идеального конденсатора; *б*) реального конденсатора



в) Потери в конденсаторах. Идеальный конденсатор имеет только емкость и не имеет никаких потерь (рис. 9.2*а*). Однако реальные конденсаторы имеют потери из-за несовершенных изоляционных свойств диэлектрика, вследствие чего он нагревается. Это явление выражено особенно сильно на высоких частотах и, как мы уже видели, обусловлено периодической перео-

риентацией молекул под воздействием переменного электрического поля. Потери в диэлектрике можно выразить условно *сопротивлением потерь*, соединенным параллельно с конденсатором (рис. 9.2*б*). В конденсаторах высокого качества это сопротивление потерь даже и на высоких частотах имеет большую величину, примерно $100 \div 1000$ МОм — и в большинстве случаев не оказывает влияния на работу конденсатора. В конденсаторах низкого качества, однако, с увеличением частоты сопротивление потерь резко уменьшается, примерно до 1000—10 000 Ом. В этом случае оно шунтирует конденсатор, и свойства цепи сильно изменяются.

Как мы позже в этом убедимся, свойства различных видов конденсаторов определяются, в основном, особенностями используемого диэлектрика, т. к. металлические обкладки играют второстепенную роль.

9.2. Постоянные конденсаторы

Как показывает само их название, емкость этих конденсаторов определяется во время их производства и после не может изменяться.

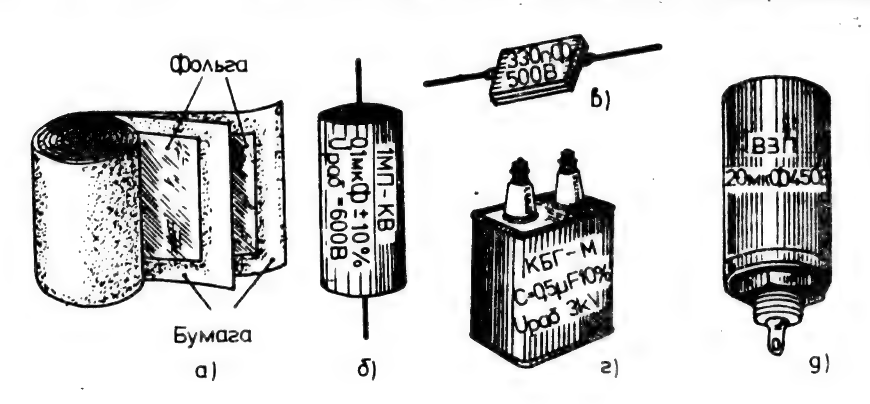
а) Бумажные конденсаторы. Они состоят из двух фольговых лент, изолированных друг от друга вощеной бумагой. Все это свертывается рулоном и помещается в изоляционную трубку, при этом оба вывода конденсатора соединены с обеими лентами (рис. 9.3*а, б, г*). Для предохранения от внешних влияний конденсатор с двух сторон заливается специальной смолой. *Бумажные конденсаторы применяются только на низких частотах* (или в случае, когда они шунтированы низкоомным сопротивлением), потому что с повышением частоты их потери заметно возрастают, т. е. $R_{пот}$ (рис. 9.2*б*) сильно уменьшается.

б) Слюдяные конденсаторы. В них диэлектриком является слюда, и обычно весь конденсатор запрессован в пластмассу (рис. 9.3*в*). В принципе, они производятся с небольшими емкостями (от 1 пФ до 10 нФ) и имеют малые потери на высоких частотах.

в) Керамические конденсаторы. В них диэлектриком является специальная керамика, имеющая малые потери на высоких частотах, и сравнительно большую относительную диэлектрическую проницаемость. Эти конденсаторы производятся в виде дисков или трубок и имеют относительно малые размеры.

г) Стирофлексные конденсаторы. По конструкции они подобны бумажным конденсаторам, но в них диэлектриком служит тонкая прозрачная лента из полистирола (стирофлекс). Эти конденсаторы довольно прочны, и их не помещают в изоляционную трубку. Они имеют сравнительно малые потери на высоких частотах.

Рис. 9.3. Кондесаторы: *а*), *б*) бумажный; *в*) слюдяной; *г*) высоковольтный; *д*) электролитический

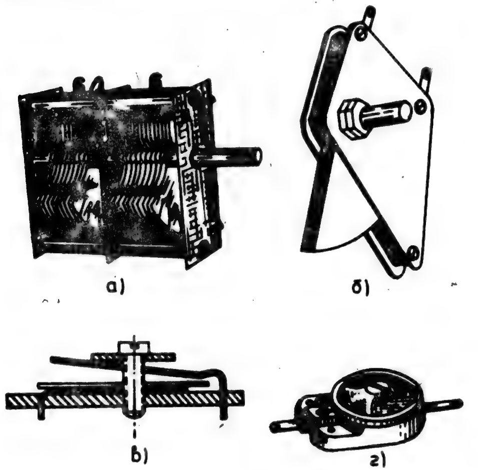


д) Электролитические конденсаторы. Они характеризуются большой емкостью при относительно малых размерах (рис. 9.3*д*). В качестве диэлектрика в них используется тонкий слой окиси алюминия Al_2O_3. Несмотря на то, что этот слой очень тонок, он имеет большую электрическую прочность. Эта окись расположена между положительным полюсом конденсатора и электролитом, электрически соединенным с корпусом конденсатора. Поэтому *электролитические конденсаторы имеют полярность, которую необходимо соблюдать при монтаже* (корпус у них — это отрицательный электрод). Электролитические конденсаторы пригодны для работы только на низких частотах (или когда шунтируются низкоомным сопротивлением), поскольку с увеличением частоты сопротивление потерь очень уменьшается.

9.3. Переменные конденсаторы

Емкость этих конденсаторов может изменяться в определенных границах (от $C_{мин}$ до $C_{макс}$) по нашему желанию. На рис. 9.4*а* показан двойной переменный конденсатор с воздушным диэлектриком. При повороте оси секции ротора более или менее проникают между пластинами статора, изменяя таким образом его емкость. На рис. 9.4*б* показан переменный конденсатор с твердым диэлектриком.

Рис. 9.4. Переменные конденсаторы: *а*) двойной с воздушным диэлектриком; *б*) единичный с твердым диэлектриком; *в*) подстроечный конденсатор; *г*) керамический подстроечный конденсатор



Конденсаторы, показанные на рис. 9.4*в*, называются *полупеременными*. В первом из них изменение емкости достигается путем приближения и удаления электродов, а во втором — поворотом. Полупеременные конденсаторы используются для *подстройки* колебательных контуров.

На рис. 9.5 показано обозначение различных конденсаторов в радиосхемах.

9.4. Соединение конденсаторов

На практике часто используются следующие соединения конденсаторов.

а) Параллельное соединение. В этом

Рис. 9.5. Обозначение конденсаторов

Конденсатор постоянной емкости
Полупеременный (подстроечный) конденсатор
Полупеременный конденсатор
Единичный переменный конденсатор
+
Двойной переменный конденсатор
Электролитический конденсатор

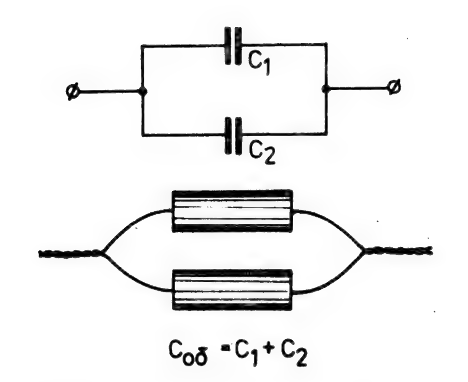


Рис. 9.6. Параллельное соединение конденсаторов

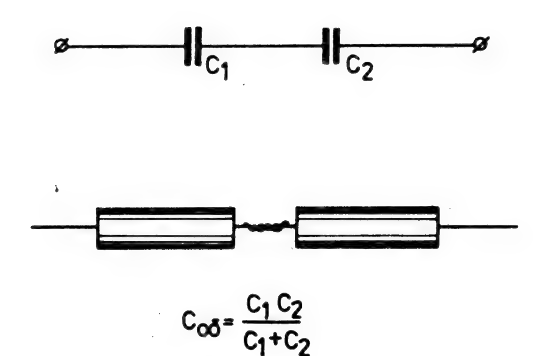


Рис. 9.7. Последовательное соединение конденсаторов

случае (рис. 9.6) общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов

$$C_{об}=C_1+C_2+C_3+\ ... \qquad (9.1)$$

Например, если имеем $C_1=4700$ пФ и $C_2=6800$ пФ, то $C_{об}=11\,500$ пФ. Очевидно, *при параллельном соединении на каждый отдельный конденсатор действует одно и то же напряжение*, а конденсатор бóльшей емкости заряжается бóльшим количеством электричества.

б) Последовательное соединение. В этом случае (рис. 9.7) значение общей емкости меньше значения наименьшего конденсатора. Если последовательно соединены два конденсатора, то общую емкость можно вычислить по формуле

$$C_{об}=\frac{C_1\cdot C_2}{C_1+C_2}. \qquad (9.2)$$

Пример 9.1. Найти общую емкость двух последовательно соединенных конденсаторов, если $C_1=1000$ пФ и $C_2=10$ пФ.

$$C_{об}=\frac{C_1\cdot C_2}{C_1+C_2}=\frac{1000\cdot 10}{1000+10}\quad 9{,}9 \text{ пФ}.$$

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Основными параметрами любого конденсатора являются номинальная емкость, рабочее напряжение, потери на высоких частотах.**
2. **Свойства данного конденсатора обуславливаются в основном качеством его диэлектрика.**
3. **Бумажные и электролитические конденсаторы следует использовать для работы только на низких частотах (или на высоких частотах, если они шунтированы низкоомными сопротивлениями).**
4. **Из всех видов конденсаторов только электролитические имеют полярность, которую надо соблюдать при монтаже.**
5. **При параллельном соединении конденсаторов общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.**
6. **При последовательном соединении конденсаторов общая емкость меньше емкости наименьшего конденсатора.**

10 Электромагнетизм

10.1. Постоянные магниты

Каждый из нас видел магни́т (рис. 10.1*а*). Он имеет два полюса, вокруг которых существует *магнитное поле*. Посредством этого поля магнит взаимодействует с другими магнитами и магнитными телами (рис. 10.1*б*, *в*), при этом *одноименные полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются*. Магнитное поле невидимо, но его существование можно доказать, если на магнит наложить лист бумаги и насыпать на него железные опилки (рис. 10.2*а*). Магнитное поле изображается условно с помощью магнитных силовых линий. Они начинаются от северного полюса N и заканчиваются в южном полюсе S (рис. 10.2*б*). Магнитное поле сильнее там, где гуще силовые линии.

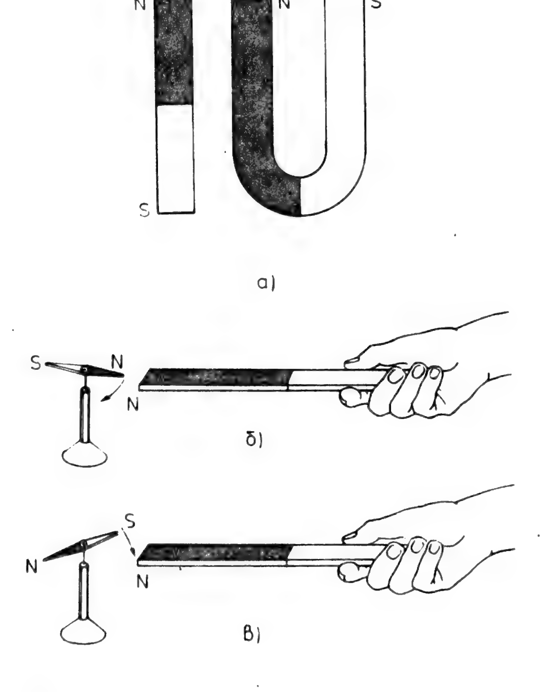


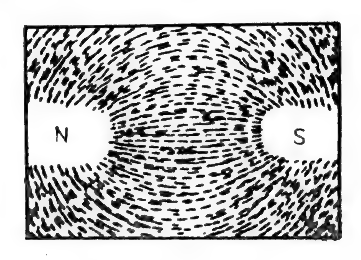
Рис. 10.1. *а*) постоянные магниты; *б*) одноименные полюсы отталкиваются; *в*) разноименные полюсы притягиваются

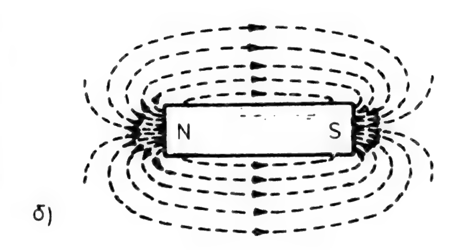
10.2. Магнитное действие тока

На рис. 10.3*а* показан простой опыт, который можем сделать самостоятельно. Для этого на железный болт или толстый гвоздь наматываем 100—150 витков изолированного медного провода диаметром 0,2 ÷ 0,3 мм. При протекании электрического тока через провод болт нама́гничивается, т. е. становится *электромагнитом*. При прекращении тока болт теряет свои магнитные свойства. Каким образом электрический ток намагничивает болт?

Вокруг любого проводника, по кото-

Рис. 10.2. *а*) магнитные силовые линии; *б*) магнитные силовые линии выходят из северного и входят в южный магнитный полюс





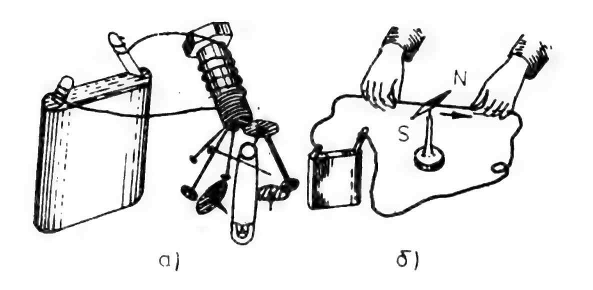


Рис. 10.3 *а)* самодельный электромагнит; *б)* простой опыт, который показвает, что около любого проводника, по которому течет ток, образуется магнитное поле

рому протекает ток, существует магнитное поле. Это можно доказать на опыте, показанном на рис. 10.3*б*, где магнитное поле проводника воздействует на компас. Подобно электрическому полю *магнитное поле тоже является носителем энергии.*

На рис. 10.4*а* показан другой опыт, в котором магнитное поле проводника становится „видимым" с помощью железных опилок, насыпанных на картон. Полученные *силовые магнитные линии* расположены концентрично вокруг проводника, при этом *их направление связано с направлением протекающего тока.* Как только мы меняем направление тока, силовые линии меняют свое направление.

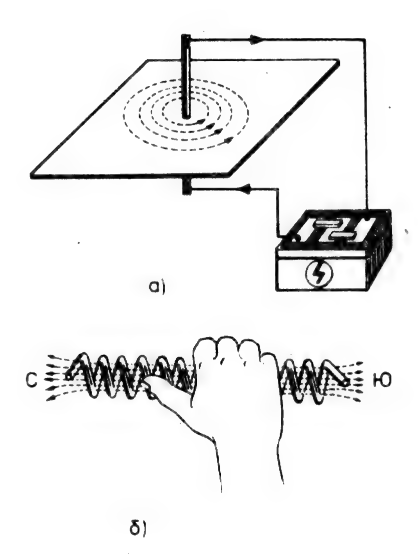
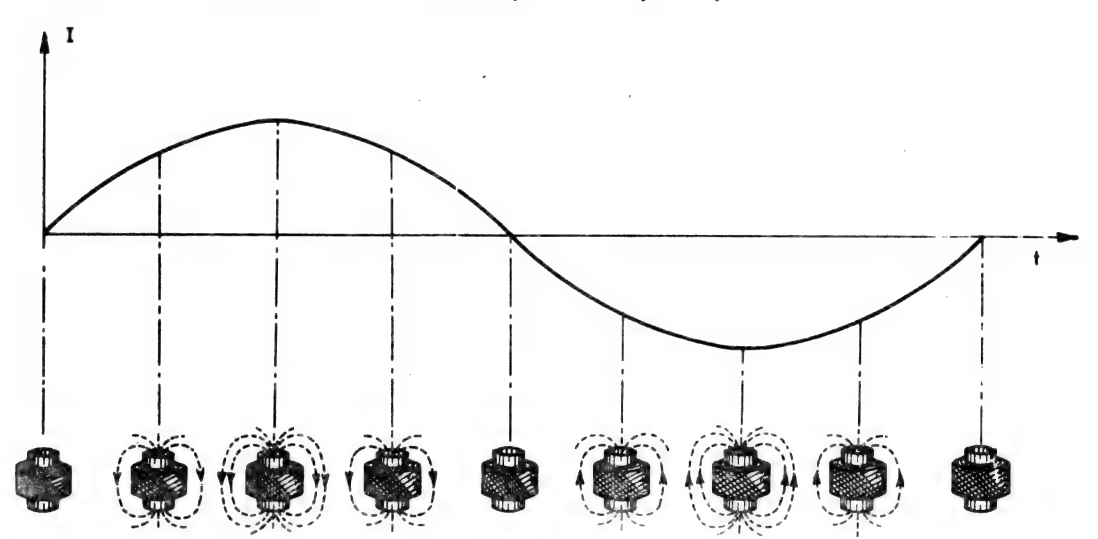


Рис. 10.4. *а*) силовые магнитные линии всегда замкнуты; *б*) если проводник, по которому течет ток, намотан в виде обмотки, получается электромагнит с двумя полюсами

10.3. Катушка

Если намотаем провод в виде спирали, то магнитные поля отдельных витков суммируются и получается *катушка*, которая имеет северный и южный полюс (рис. 10.4*б*). Чем больше витков и чем больше тока протекает через них,

Рис. 10.5. Магнитное поле, изменяющееся по синусоидальному закону



тем сильнее магнитное поле катушки.

Если в катушку поместить железное тело, то общее магнитное поле усилится. Следовательно, *железный сердечник концентрирует и усиливает магнитное поле, созданное катушкой.* Подобными свойствами обладают только *железо, никель, кобальт и их сплавы*, и эти вещества называются **ферромагнитными**. Надо хорошо запомнить, что медь, алюминий, цинк и пр. не обладают магнитными свойствами.

Когда по виткам катушки протекает *переменный ток*, то ее магнитное поле тоже становится *переменным*. На рис. 10.5 показано магнитное поле катушки, по которой протекает переменный синусоидальный ток. Видно, что на протяжении одного периода магнитное поле катушки изменяет не только свою силу, но и свое направление. Короче говоря, магнитное поле тоже изменяется по синусоидальному закону.

10.4. Электромагнитная индукция

На рис. 10.6*а* показан интересный опыт. При движении магнита вниз и вверх в отверстии катушки, стрелка миллиамперметра отклоняется, т. е. в цепи протекает ток. Аналогичное явление получается, если вместо постоянного магнита используется электромагнит (рис. 10.6*б*). Это явление называется **электромагнитной индукцией** и исключительно важно для радиоэлектроники.

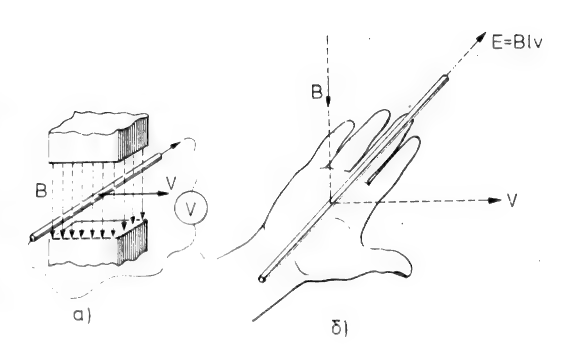
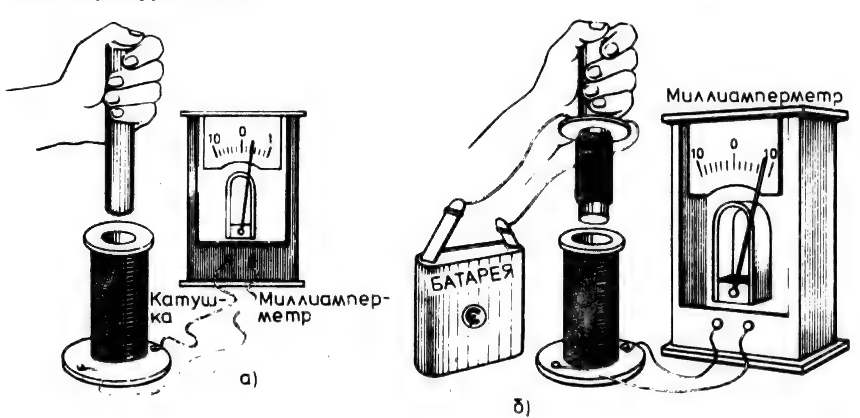


Рис. 10.7. *а*) при пересечении проводником магнитных силовых линий в нем индуктируется определенная ЭДС; *б*) правило правой руки для электромагнитной индукции

Основной закон электромагнитной индукции гласит: *если данный проводник пересекает магнитные силовые линии, то в нем индуктируется определенная электродвижущая сила (ЭДС).* Не имеет значения движутся ли магнитные силовые линии, а проводник неподвижен, или движется проводник, а магнитные линии неподвижны. Индуктированная ЭДС тем больше, чем быстрее происходит пересечение, чем сильнее магнитное поле и чем больше витков в катушке.

Направление индуктированного на-

Рис. 10.6. *а*) при движении магнита в катушке индуктируется ЭДС; *б*) при движении электромагнита в катушке тоже индуктируется ЭДС



пряжения определяется *правилом правой руки*, которое гласит: если магнитное поле пронизывает ладонь, а большой палец показывает направление движения проводника, то другие пальцы показывают направление индуктированного напряжения (рис. 10.7).

10.5. Взаимная индукция

На рис. 10.8 показан опыт, в котором две катушки L_1 и L_2 расположены близко друг к другу. Когда через катушку L_1 протекает *переменный ток*, в

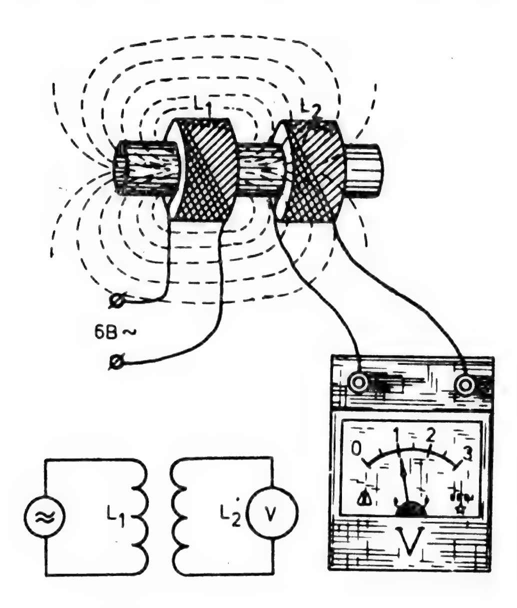


Рис. 10.8. Взаимная индукция

катушке L_2 индуктируется ЭДС, которую можно измерить вольтметром. Это явление называется **взаимной индукцией** и лежит в основе трансформаторов, индуктивно связанных цепей и т. д. При взаимной индукции обе катушки неподвижны, но ток, протекающий через L_1, переменный, и число силовых линий, исходящих из L_1 и пересекающих L_2, непрерывно изменяется (пульсирует) с частотой тока, и поэтому в L_2 индуктируется определенная ЭДС. Индуктированная ЭДС зависит от числа витков обеих катушек, от величины и частоты тока, протекающего через L_1, и от взаимного расположения катушек.

Обратите внимание: если через катушку L_1(рис. 10.8) протекает *постоянный ток*, то вокруг нее образуется магнитное поле, но оно не будет переменным и в L_2 не будет индуктироваться ЭДС.

10.6. Индуктивность

Если через проводник протекает *переменный ток*, то магнитные силовые линии пересекают собственный проводник и согласно закону электромагнитной индукции в проводнике возникает **ЭДС самоиндукции**. Русский физик Эмиль Христианович Ленц (1804—1865) первый изучил это явление и сформулировал правило, согласно которому *ЭДС самоиндукции имеет такое направление, что в любой момент оно противодействует приложенному извне напряжению* (правило Ленца). На рис. 10.9 видно, что при увеличении тока силовые магнитные линии как будто „выходят“ из оси проводника и концентрическими окружностями распространяются наружу, а ЭДС самоиндукции имеет направление, противоположное увеличивающемуся току. При уменьшении тока силовые магнитные линии концентрическими окружностями возвращаются к оси проводника, а ЭДС самоиндукции имеет такое направление, что „помогает“ уменьшающемуся току.

Если провод намотан в виде катушки, то вышеописанное явление проявляется еще сильнее, потому что каждая силовая линия пересекает большое число *соседних витков*. Это можно продемонстрировать, если использовать первичную обмотку сетевого или выходного трансформатора (рис. 10.10). При замыкании ключа на лампочку действует напряжение 4,5 В и она светит нормально. При разрыве цепи магнитные силовые линии „собираются“ к центру и пересекают большое число

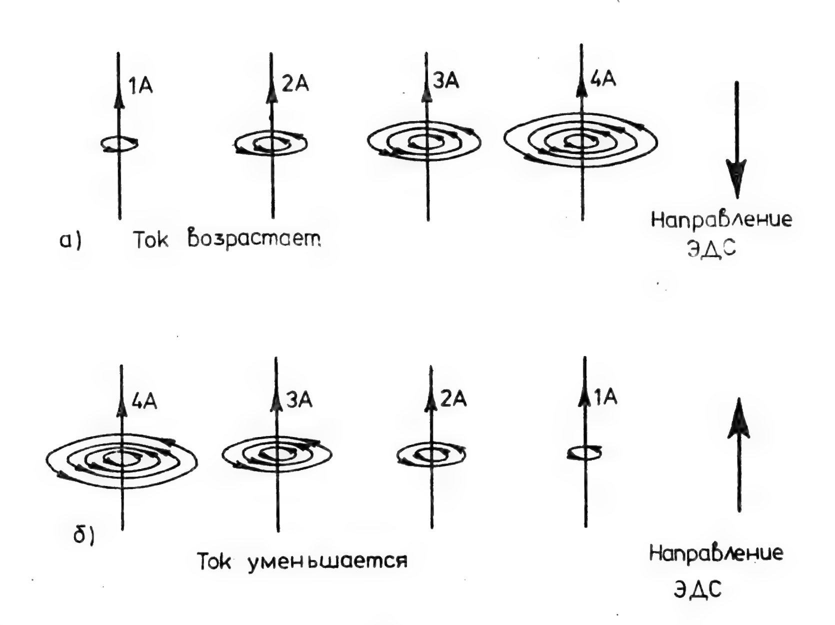


Рис. 10.9. Опыты, иллюстрирующие правило Ленца: *а*) при увеличении тока ЭДС самоиндукции имеет противоположное направление; *б*) при уменьшении тока ЭДС самоиндукции имеет направление, совпадающее с направлением тока

витков. Так как ЭДС самоиндукции довольно значительна, лампочка вспыхивает на мгновение ярче, потом гаснет. Этот опыт подтверждает сказанное уже, что магнитное поле является носителем энергии и после разрыва цепи эта энергия не теряется, а переходит в лампочку.

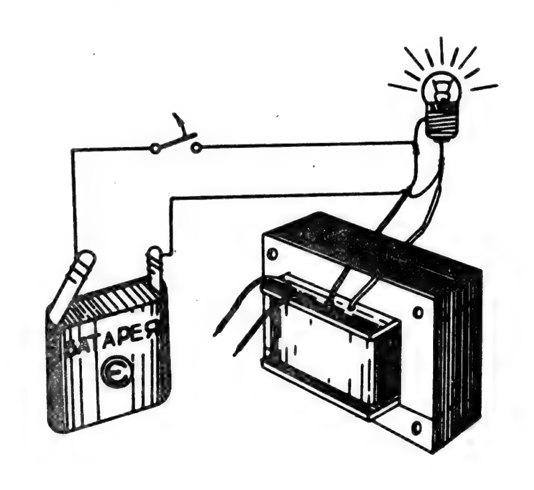
Свойство каждой катушки образовывать магнитные силовые линии вокруг себя при прохождении тока через ее витки называется индуктивностью.

Свойство индуктивности выражается и в том, что когда через данную катушку протекает ток, то при любом изменении его величины в катушке индуктируется противодействующая ЭДС. Если через две различные катушки протекает один и тот же ток, то бóльшую индуктивность имеет та катушка, вокруг которой образуется больше силовых магнитных линий, т. е. около которой получается бóльший магнитный поток.

Индуктивность тем больше, чем больше число витков катушки. При прочих равных условиях катушки с ферромагнитным сердечником имеют большую индуктивность. Единица индуктивности называется **генри (Г)** в честь американского ученого **Джозефа Генри** (1797—1878). *Катушка имеет индуктивность 1 генри, если при изменении тока через нее на 1 ампер за 1 секунду на обоих концах ее возникает напряжение самоиндукции в 1 вольт.*

В радиоэлектронике часто ис-

Рис. 10.10. Опыт, иллюстрирующий ЭДС самоиндукции



пользуются и меньшие единицы: **миллигенри** (одна тысячная генри) и **микрогенри** (одна миллионная генри), которые можем записать:

1 мГ=0,001 Г;

1 мкГ=0,000 001 Г.

Например, однослойная катушка диаметром 4 см, длиной 5 см и числом витков 90 имеет индуктивность около 200 мкГ; первичная обмотка силового трансформатора, содержащая 1200 витков и имеющая полезный сердечник сечением 9 см^2, имеет индуктивность около 1 Г.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Между полюсами постоянных магнитов существует магнитное поле, которое является носителем энергии.**
2. **Вокруг любого проводника, по которому протекает ток, существует магнитное поле.**
3. **Закон электромагнитной индукции гласит: если данный проводник пересекают силовые магнитные линии, то в нем индуктируется ЭДС.**
4. **Если имеем две индуктивно соединенные катушки и в одной из них протекает переменный ток, то во второй катушке вследствие взаимной индукции возникает ЭДС.**
5. **Индуктивность — это свойство катушки при протекании через ее витки тока образовывать вокруг них магнитный поток.**
6. **Единица измерения индуктивности называется генри.**
7. **Согласно правилу Ленца ЭДС самоиндукции имеет такое направление, что в любой момент оно противодействует изменению тока.**

11 Некоторые свойства индуктивности

Виды катушек

11.1. Индуктивность в цепи постоянного тока

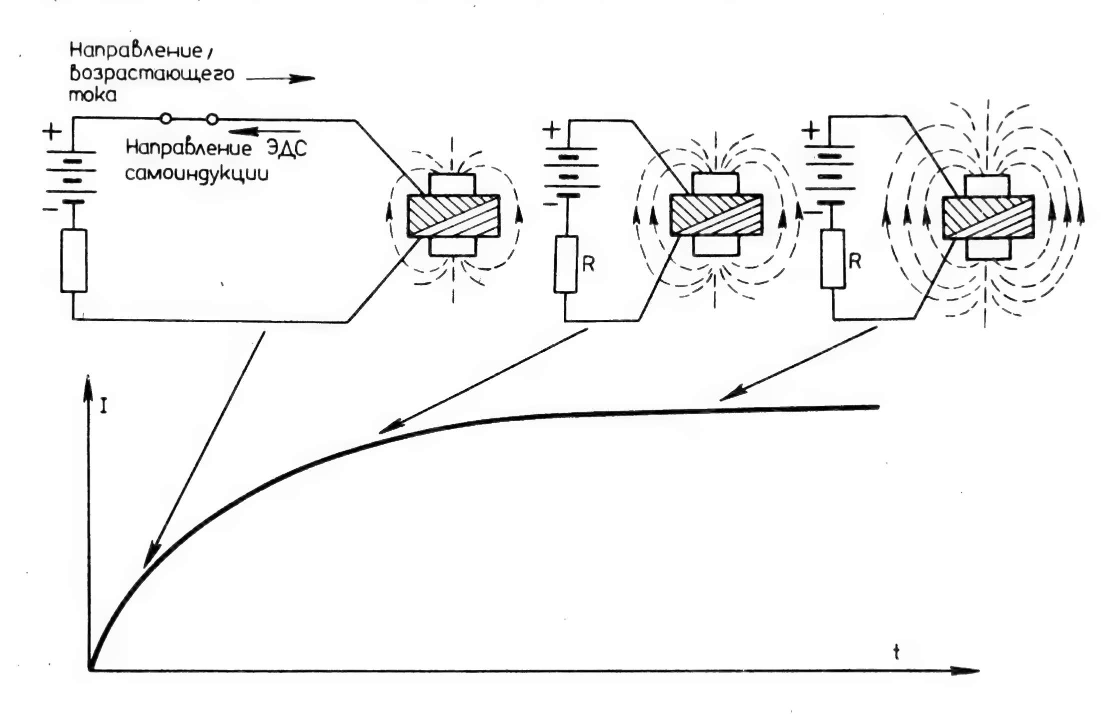
При включении катушки в цепь постоянного тока также происходят переходные процессы. При замыкании цепи (рис. 11.1) от батареи начинает протекать ток, и вокруг катушки возникает магнитное поле. Его магнитные силовые линии распространяются от катушки наружу, пересекая при этом ее собственные витки. Вследствие этого в катушке возникает *ЭДС самоиндукции*, которая, согласно правилу Ленца, препятствует нарастанию тока. Разумеется, ток не прекращается, но его нарастание не происходит мгновенно, а постепенно, по экспоненциальному закону (рис. 11.1). Через короткое время переходный процесс заканчивается, и ток достигает своего нормального значения. Продолжительность переходного процесса можно вычислить по формуле

$$t=\frac{3L}{R}, \qquad (11.1)$$

где L — индуктивность катушки, а R — сопротивление всей цепи.

Пример 11. 1. Определить продолжительность переходного процесса при замыкании цепи, содержащей ка-

Рис. 11.1. При замыкании цепи, содержащей индуктивность, ток увеличивается не резко, а постепенно (по экспоненте)



тушку индуктивности $L=0{,}5$ Г и общее сопротивление цепи $R=150$ Ом.

Из формулы (11.1) находим

$$t=\frac{3L}{R}=\frac{3\ .\ 0{,}5}{150}=0{,}01\ \text{с.}$$

Если разомкнуть цепь, когда через катушку протекает постоянный ток, то тоже возникнет переходный процесс (подобный опыт был показан на рис. 10.10). В этом случае силовые магнитные линии приближаются к катушке. При этом они пересекают витки, и в катушке возникает ЭДС самоиндукции, направление которой, согласно правилу Ленца, совпадает с направлением только что прерванного тока. Особенно важно запомнить, что если катушка обладает значительной индуктивностью и через нее протекает большой ток, то ЭДС самоиндукции, возникающая на концах катушки, *может быть во много раз больше напряжения самого источника питания*. Это явление объясняется тем фактом, что при размыкании цепи энергия, запасенная в магнитном поле катушки, не исчезает, а снова превращается в ток, но со значительным напряжением, так что между концами катушки даже может проскочить искра. Эта особенность очень важна на практике, поскольку может привести к пробою между обмотками, неисправности транзисторов и т. д. Или, короче говоря, кратковременное прерывание значительного по величине тока через катушку относительно большой индуктивности приводит к возникновению опасных напряжений на концах катушки, против чего должны быть приняты меры.

11.2. Индуктивность в цепи переменного тока

Допустим, что у нас имеется идеальная катушка (т. е. сопротивление провода и все потери равны нулю), и приложим к ней *переменное напряжение*. Согласно правилу Ленца, ЭДС самоиндукции в любой момент будет противодействовать приложенному извне напряжению.

В результате катушка окажет переменному току **индуктивное сопротивление**, которое обозначается знаком X_L, измеряется в омах и вычисляется по формуле:

$$X_L=\omega L=2\pi fL. \qquad (11.2)$$

Индуктивное сопротивление *зависит от частоты*. Чем больше индуктивность катушки и выше частота тока, тем больше индуктивное сопротивление.

Пример 11.2. Найти индуктивное сопротивление катушки индуктивностью 5 Г на частоте 50 Гц.

Подставляем числовые значения в формулу (11.2):
$X_L=2\pi fL=2\pi\cdot 50\cdot 5=1570$ Ом.

Та же катушка на частоте 1 кГц имеет индуктивное сопротивление $X_L=31$ кОм, а на частоте 1 МГц ее сопротивление возрастает до 31 МОм. На рис. 11.2 показана графическая зависимость индуктивного сопротивления упомянутой катушки от частоты (т. н. частотная характеристика). Теперь, когда мы ознакомились с индуктивным сопротивлением, можем записать закон Ома при переменном токе через катушку

$$U=X_LI, \quad X_L=\frac{U}{I}, \quad I=\frac{U}{X_L}. \qquad (11.3)$$

Пример 11.3. Какой ток протечет через идеальную катушку индуктивности $L=600$ мкГ, если подключить ее к переменному напряжению $U=0{,}4$ В частотой $f=500$ кГц?

Приводим величины к основным единицам и подставляем в формулу (11.3):

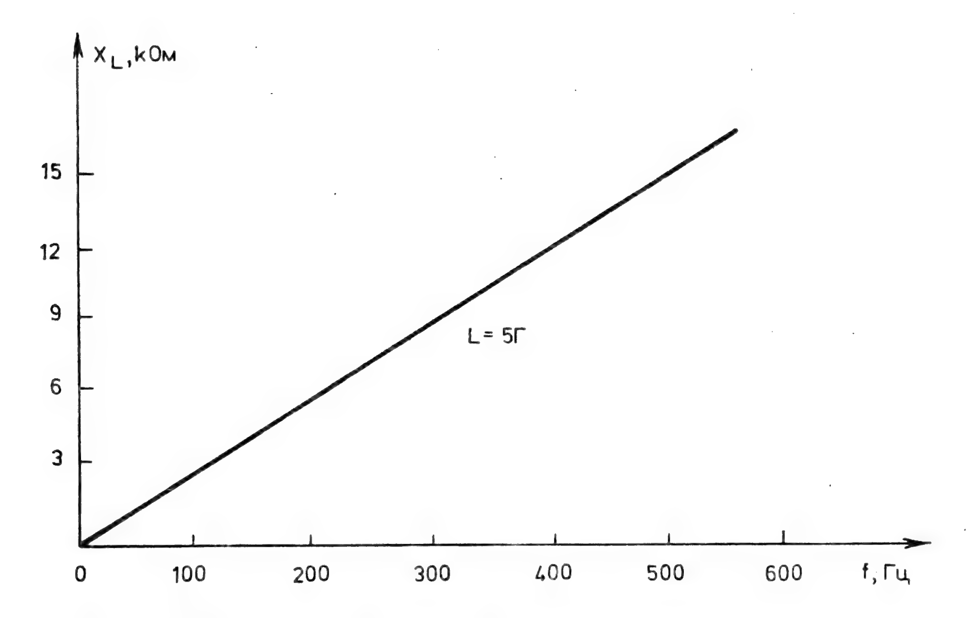


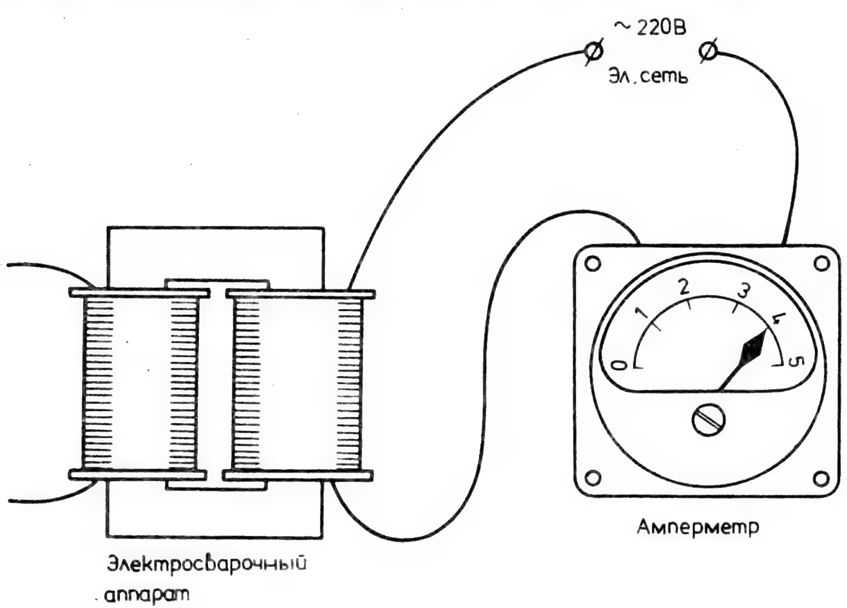
Рис. 11.2. При увеличении частоты индуктивное сопротивление увеличивается

$$I=\frac{U}{X_L}=\frac{U}{2\pi fL}=$$

$$=\frac{0{,}4}{2\pi\,.\;5\,.\,10^5\,.\,600\,.\,10^{-6}}=0{,}2\ \text{мА}.$$

Сопротивление идеальной катушки (подобно конденсатору) *реактивно.* Чтобы выяснить это, рассмотрим опыт, показанный на рис. 11.3. Здесь при работе на холостом ходу через первичную обмотку электросварочного аппарата протекает ток 4 А. Поэтому на первый взгляд мощность, подавае-

Рис. 11.3. На холостом ходу в первичной обмотке электросварочного аппарата протекает ток значительной величины, однако катушка не нагревается, т. к. ее сопротивление реактивно



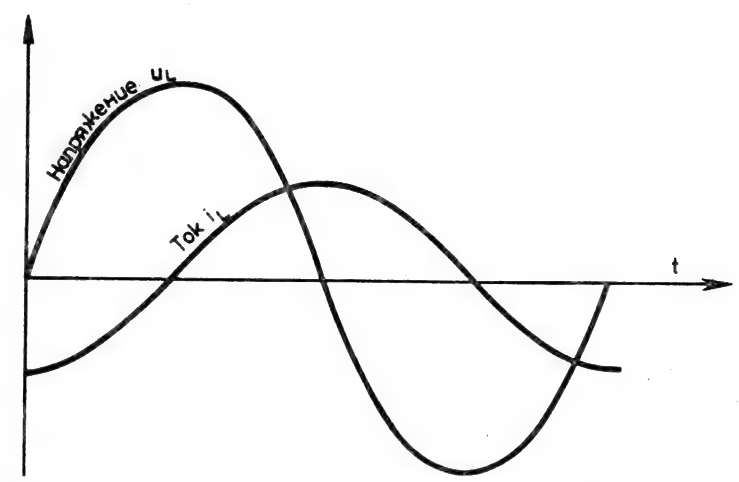


Рис. 11.4. В индуктивных сопротивлениях напряжение опережает ток на 180°

мая из сети в первичную обмотку, равна $P = U \cdot I = 220 \cdot 4 = 880$ Вт, т. е. она такая же, как в электрической плитке средней величины. Однако опыт показывает (рис. 11.3), что и после продолжительной работы электросварочного аппарата, обмотка остается холодной. Более того, вопреки тому, что в цепи протекает ток величиной 4 А, диск электросчетчика неподвижен. Как это объяснить?

Как в случае с конденсаторами, так и здесь, *мощность реактивна. Это значит, что за одну четверть периода к катушке поступает энергия, ее магнитное поле „расширяется", и в нем накапливается магнитная энергия, а за другую четверть периода это магнитное поле „сворачивается" обратно к катушке, индуктирует в ней ЭДС самоиндукции и отдает энергию обратно генератору*. Следовательно, в этом случае происходит *постоянный обмен энергией* между генератором (электростанцией) и катушкой, в то время как средняя мощность равна нулю. Вот почему формула $P = UI$, приложенная к идеальным катушкам, дает не активную, а реактивную (обменную) мощность.

Эта особенность катушки объясняется тем фактом, что приложенное напряжение и протекающий ток имеют между собой разность фаз в 90°, а *напряжение опережает ток* (рис. 11.4). Причиной этой разности фаз является только индуктированная ЭДС, которая при увеличении тока направлена против него, а при уменьшении следует его направлению (см. рис. 10.9).

11.3. Реальные катушки индуктивности

Реальные катушки обладают не только индуктивным сопротивлением X_L, но и *активным сопротивлением (сопротивлением потерь)* $R_{пот}$ (рис. 11.5).

На низких частотах $R_{пот}$ обусловлено только активным сопротивлением провода, которым намотана катушка. На высоких частотах $R_{пот}$ возрастает, поскольку включает в себя не только активное сопротивление, но и ряд других потерь (например, излучение, вызванное токами Фуко, поверхностным эффектом и т. д.). *Полное сопротивление*, которое катушка оказывает переменному току, называется **импедансом** и обозначается буквой Z. Импеданс измеряется в омах и на средних частотах вычисляется по формуле:

$$Z = \sqrt{R_{пот}^2 + X_L^2}. \qquad (11.4)$$

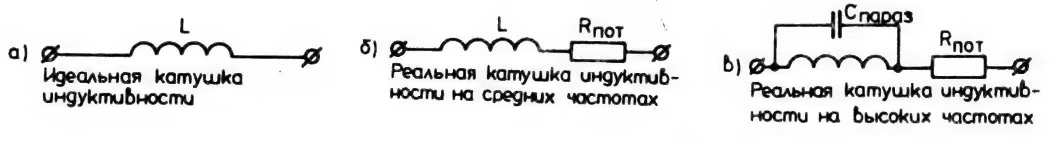


Рис. 11.5. Эквивалентные схемы: *а*) идеальной катушки; *б*) реальной катушки на высоких частотах

Очевидно, *при увеличении частоты возрастает и импеданс*, поскольку увеличивается X_L.

На высоких частотах начинает оказывать влияние собственная емкость катушки $C_{\text{параз}}$ (рис. 11.5), которая в принципе нежелательна, потому что шунтирует индуктивность и усложняет явления.

11.4. Высокочастотные катушки индуктивности

Эти катушки индуктивности используют в цепях, в которых протекает ток высокой частоты, например, в колебательных контурах входных устройств, фильтрах и пр.

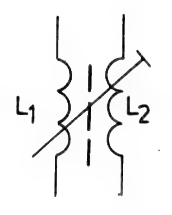
Обычно высокочастотных катушек индуктивности нет в продаже, они изготавливаются самими радиолюбителями. Некоторые ВЧ катушки индуктивности имеют ферритные сердечники. Применение сердечника приводит к *увеличению индуктивности* катушки. Кроме того, он *улучшает качества* катушки, а с другой стороны дает возможность *легко и просто изменять индуктивность* катушки в определенных пределах. Ферритные сердечники изготавливаются по специальной технологии.

Основное требование к ферритным сердечникам — *большая магнитная проницаемость и малые потери на высо-*

Рис. 11.6. Высокочастотные катушки: *а*) коротковолновая катушка, намотанная на цилиндрический каркас; *б*) коротковолновая, намотанная на шестигранный каркас; *в*) коротковолновая, бескаркасная; *г*) средневолновая „универсаль" с ферритом; *д*) коротковолновая входная и контурная; *е*) ультракоротковолновая с латунным сердечником; *ж*) катушка с броневым сердечником







Обычная катушка индуктивности

Катушка индуктивности с высокочастотным сердечником

Катушка индуктивности с высокочастотным сердечником и переменной индуктивностью

Катушки с индуктивной связью с в.ч. сердечником

Рис. 11.7. Обозначения катушек

ких частотах. На рис. 11.6 показано несколько видов высокочастотных катушек индуктивности, некоторые из них с ферритными сердечниками, другие без них. Обозначение различных видов катушек индуктивности показано на рис. 11.7.

11.5. Основные параметры высокочастотных катушек индуктивности

Перечислим наиболее важные параметры высокочастотных катушек индуктивности.

а) Индуктивность. Она зависит от числа витков, геометрических размеров и наличия ферритного сердечника. Чем больше витков, тем больше индуктивность катушки. Наличие сердечника увеличивает индуктивность катушки. Индуктивность будет наибольшей, если сердечник полностью вставлен в катушку. Катушки индуктивности, которые используются в радиоприемниках, чаще всего имеют следующие индуктивности: для длинных волн $L = 1 \div 5$ мГ, для средних волн $L = 150 \div 200$ мкГ, а для коротких волн $L = 1 \div 10$ мкГ.

б) Добротность. Качество катушки индуктивности оценивается лучше всего добротностью Q. Она равна отношению индуктивного сопротивления X_L катушки индуктивности к ее сопротивлению потерь $R_{пот}$. Катушки хорошего качества имеют добротность чаще всего от 50 до 200. Чем больше добротность катушки, тем лучше ее качество. *Основным способом улучшения добротности катушки индуктивности является уменьшение ее сопротивления потерь.* Это достигается следующими средствами:

— применением в. ч. сердечника, при наличии которого необходимая индуктивность получается при меньшем числе витков, т. е. меньшем сопротивлении провода:

— применением провода бóльшего диаметра, что, разумеется, увеличивает размеры катушки индуктивности;

— применением провода, состоящего из определенного числа изолированных друг от друга проволочек (литцендрат), что эффективно только в диапазоне длинных и средних волн.

В диапазоне коротких и ультракоротких волн хорошая добротность получается в том случае, когда катушки наматывают неизолированным проводом большого диаметра, при этом часто для уменьшения потерь совсем не используют сердечников и каркасов.

в) Собственная емкость. Как уже упоминали, собственная емкость катушки индуктивности обусловлена емкостью обмотки и в высококачественных катушках индуктивности должна быть как можно меньше. Один из способов уменьшения собственной емкости — перекрестная намотка (типа „универсаль“ — рис. 11.6*г*) или намот-

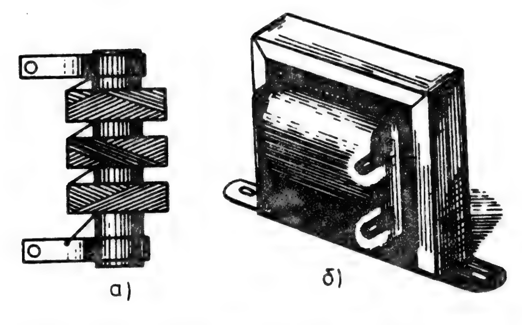


Рис. 11.8. Дроссели: *а*) высокочастотный; *б*) низкочастотный

ка отдельных витков не плотно один к другому, а на определенном расстоянии (катушки с принудительным шагом — рис. 11.6*а, б, в*).

11.6. Дроссели

Это катушки индуктивности, которые *служат для пропускания постоянного тока (или тока низкой частоты) и задержки токов высокой частоты.* На рис. 11.8*а* показан в. ч. дроссель, который для уменьшения собственной емкости состоит из трех секций. Его индуктивность около 1 мГ, а его сопротивление постоянному току $5 \div 10$ Ом. На частоте 1 кГц индуктивное сопротивление этого дросселя около 6 Ом, а на частоте 10 МГц оно около 60 кОм. Этот пример показывает, что для постоянного тока и токов низкой частоты сопротивление дросселя мало, а для токов высокой частоты велико.

На рис. 11.8*б* показан н. ч. дроссель. Он содержит примерно $1000 \div 5000$ витков и имеет железный сердечник. Его индуктивность — $1 \div 10$ Г, а его активное сопротивление $50 \div 300$ Ом. На частоте 50 Гц его индуктивное сопротивление примерно $2 \div 10$ кОм. Используется в выпрямителях тока для пропускания постоянного тока и задержки переменного тока.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **При включении катушки индуктивности в цепь постоянного тока, ток нарастает не мгновенно, а постепенно (по экспоненциальному закону). Причиной является ЭДС самоиндукции, направление которой противоположно нарастающему току.**

2. **При прекращении тока через катушку магнитные силовые линии приближаются к катушке, при этом ЭДС самоиндукции можеть быть значительно больше напряжения источника тока.**

3. **Сопротивление катушки индуктивности переменному току (индуктивное сопротивление) зависит как от индуктивности катушки, так и от частоты тока. При бóльшей индуктивности катушки оказывают бóльшее сопротивление переменному току. При увеличении частоты сопротивление данной катушки увеличивается.**

4. **Индуктивное сопротивление реактивно, т. е. цепи переменного тока магнитное поле вокруг катушки то „расширяется“, то „суживается“. При этом катушка то получает, то отдает энергию источнику тока, а средняя мощность, поступающая в катушку, равна нулю.**

5. Идеальная катушка индуктивности обладает только индуктивностью, и все потери (включительно и активное сопротивление) равны нулю. Реальные катушки индуктивности, кроме индуктивности, имеют и потери, которые условно выражаются сопротивлением потерь, соединенным последовательно с индуктивностью.

6. Основные параметры высокочастотных катушек — индуктивность, добротность и собственная емкость.

7. Качества катушки индуктивности улучшаются при использовании ферритных сердечников, более того, с их помощью можно изменять в определенных пределах индуктивность катушки.

---

12 Звук и его особенности

12.1. Сущность звука

Если бросить в воду камень, то на ее поверхности образуются волны, которые расширяются концентрическими окружностями и достигают берега (рис. 12.1). Таким же образом *вокруг любого звучащего тела образуются звуковые волны*, которые распространяются по воздуху. Если оттянуть эластичную пластинку, она начинает колебаться, приводя в движение частицы воздуха, и тогда во все стороны распространяются сферические звуковые волны (рис. 12.2). Они представляют собой *сгустки и разрежения воздуха*, т. е. места с бо́льшим и меньшим давлением.



Рис. 12.1. Волны на поверхности воды

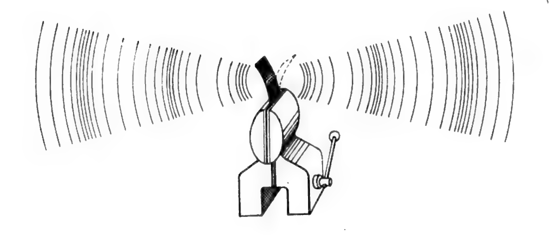


Рис. 12.2. Звуковые волны

Как только звуковые волны достигнут нашего уха (рис. 12.3), барабанная перепонка начинает колебаться и посредством мелких косточек молоточек-наковаленка-стремечко звук попадает во внутреннее ухо. Отсюда через слуховой нерв колебания передаются в головной мозг, и мы слышим звук. Следовательно, для того, чтобы был звук, необходимо наличие звучащего тела, среды для распространения звука и слухового органа.

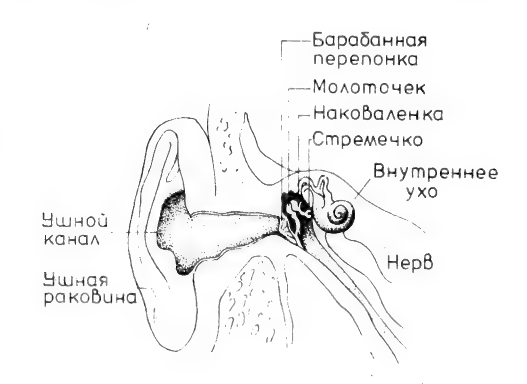


Рис. 12.3. Устройство человеческого уха

12.2. Скорость звука

Скорость распространения звука в воздухе при $t=20°$ C около 340 м/с (т. е. около 1200 км/ч), при увеличении температуры она слабо нарастает. Скорость звука (в сравнении, например, со скоростью эл. тока) не очень велика. Например, если в Варне произойдет очень сильный гром, звук будет слышен в Софии только через 20 мин. В воде звук распространяется со скоростью 1430 м/с, а в стали — со скоростью 5000 м/с.

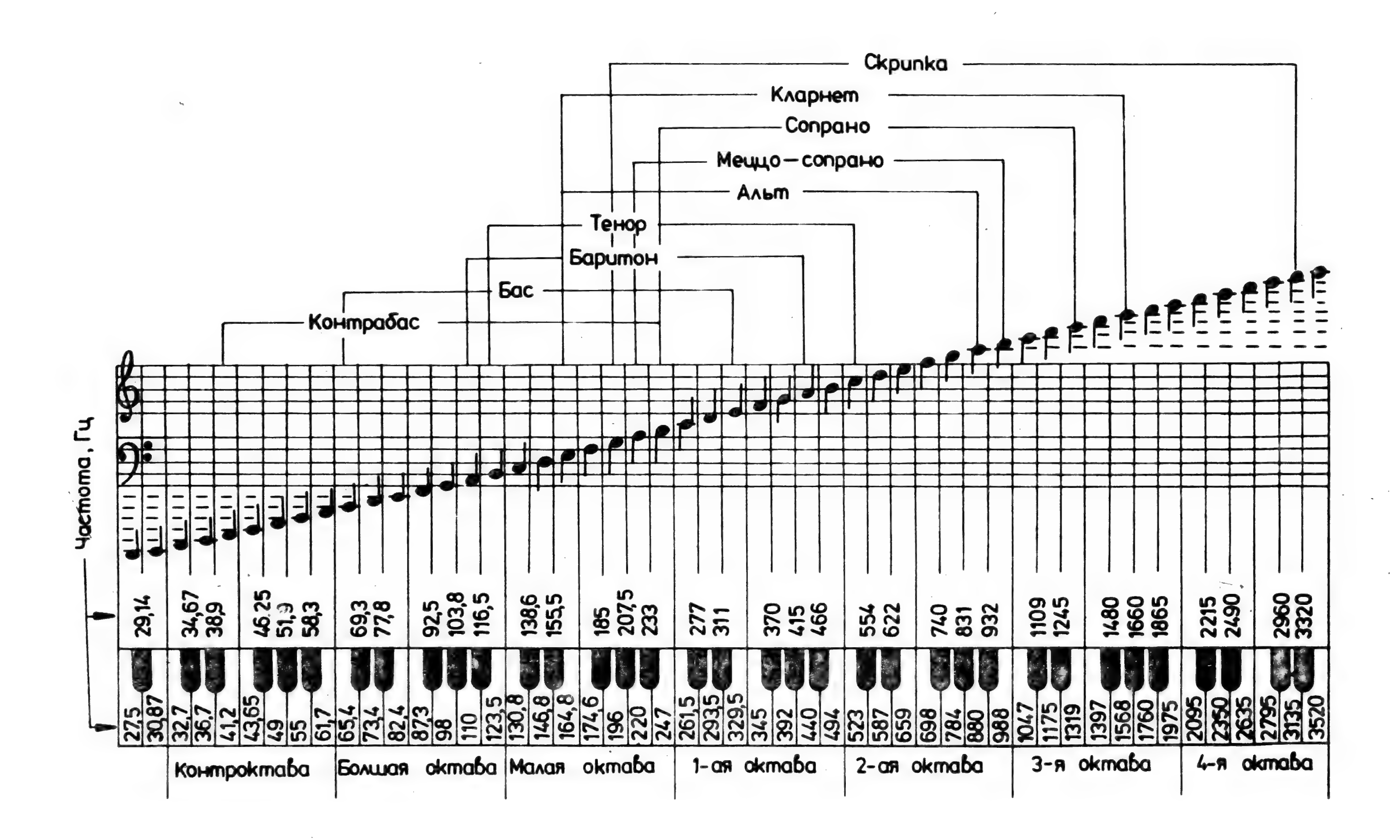


Рис. 12.4. Диапазоны частот некоторых музыкальных инструментов

12.3. Высота тонов

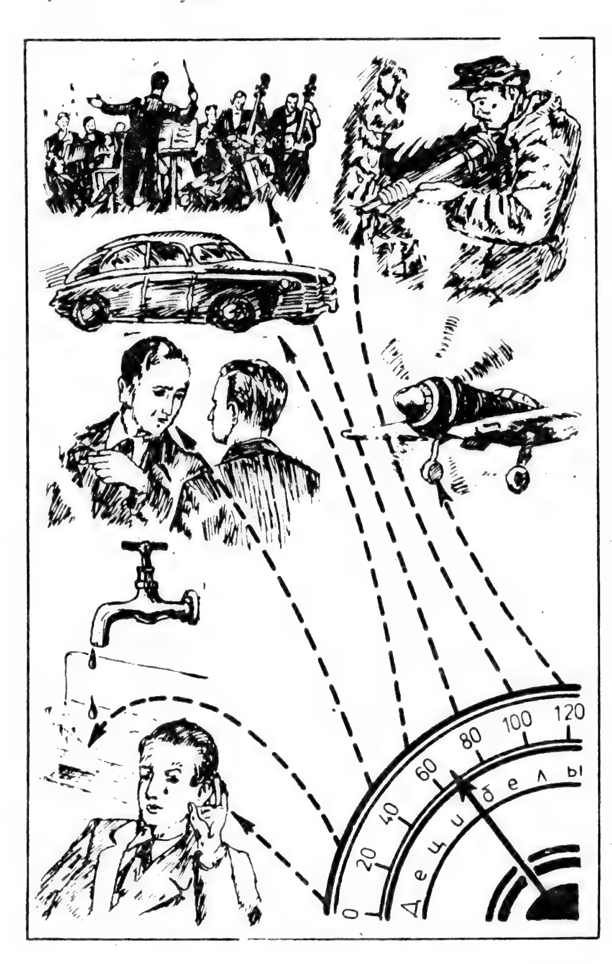
Звук определенной частоты называется **тоном**. Различные тона имеют различное число колебаний в секунду, т. е. различную частоту. *Чем выше частота, тем выше тон.* Так например, толстая струна гитары совершает 165 колебаний в секунду, а тонкая — 659 колебаний в секунду.

Самый низкий тон, который может воспринять человеческое ухо, имеет частоту 16 Гц, а самый высокий — 20 000 Гц. Разумеется, в музыке эти „крайние" тона прямо не используются. Это видно из рис. 12.4, где показаны клавиатура пианино, нотные знаки музыкальных тонов, их частоты и диапазон некоторых музыкальных инструментов. Тон „ля", по которому настраивают музыкальные инструменты, имеет частоту 440 Гц, самая толстая струна контрабаса имеет частоту 41 Гц, а самый высокий тон пианино — 3520 Гц.

12.4. Сила звука

Звуки, кроме по частоте, различаются и по **силе**. Если мы находимся близко к гитаре, звук сильнее, а когда удалимся на некоторое расстояние, сила звука уменьшается. Причиной является то, что звуковые волны при движении в воздушной среде теряют силу. Это зна-

Рис. 12.5. Громкость различных звуков



чит, что частицы воздуха все слабее и слабее отклоняются от своего среднего положения, т. е. уменьшается их амплитуда. Следовательно, *сила звука зависит от амплитуды колебаний.*

В технике для измерения силы, с которой мы слышим звуки, используется единица **децибел (дБ)**. На рис. 12.5 видно, что самый слабый звук, который может уловить наше ухо, соответствует 0 дБ, звук падающих капель воды на расстоянии 1 м соответствует 20 дБ, звуки при обычном разговоре имеют силу 40 дБ, а самый сильный звук (болевой порог) соответствует 120 дБ.

12.5. Тембр звука

Если за нашей спиной прозвучит один и тот же звук „ля" ($f=440$ Гц) на пианино и на кларнете, то мы сразу узнаем, когда звучит пианино, когда кларнет. Как же мы различаем инструменты? Ведь в обоих случаях звучит все тот же тон „ля"?

Различают музыкальные инструменты даже тогда, когда они производят один и тот же тон, по их **тембру**. *Звуковые колебания различных музыкальных инструментов не являются простыми синусоидальными колебаниями, а обладают различной „окраской", т. е. это сложные колебания* (рис. 12.6). Чисто синусоидальные колебания производит только электронный прибор, называемый звуковым генератором (тонгенератором), который используется в лабораториях.

Если суммировать два синусоидальных колебания *различной частоты и амплитуды* (рис. 12.7), то результирующее колебание будет похоже на колебания музыкальных инструментов. Собрав вместе три, четыре и больше синусоидальных колебаний различной частоты, амплитуды и фазы, можно получить и наиболее сложное периодическое колебание. Установлено, что сложные *несинусоидальные, но периодические* колебания, у которых положительный полупериод симметричен отрицательному, *можно рассматривать как сумму* одного основного синусоидального колебания частотой f_1 и

Рис. 12.6. Форма колебаний генератора — тон „ля", издаваемый пианино и кларнетом

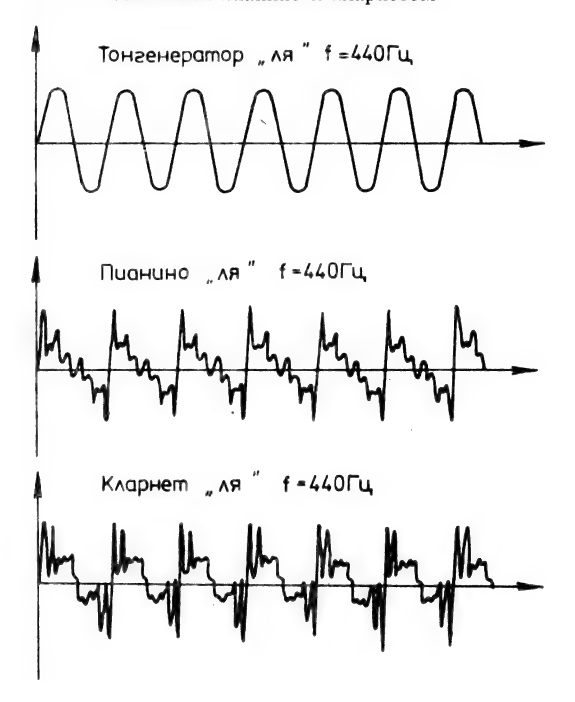
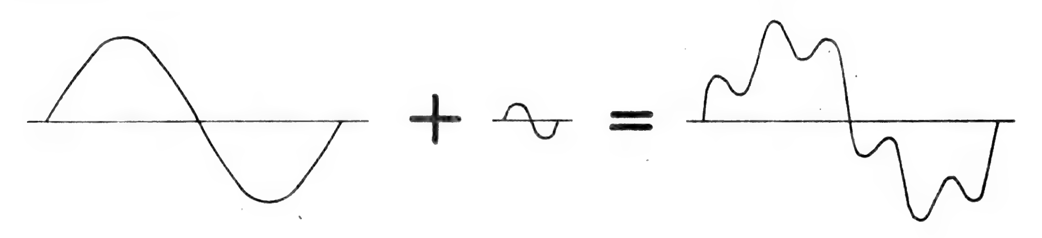


Рис. 12.7. При сложении двух синусоидальных колебаний различной частоты получаются несинусоидальные колебания



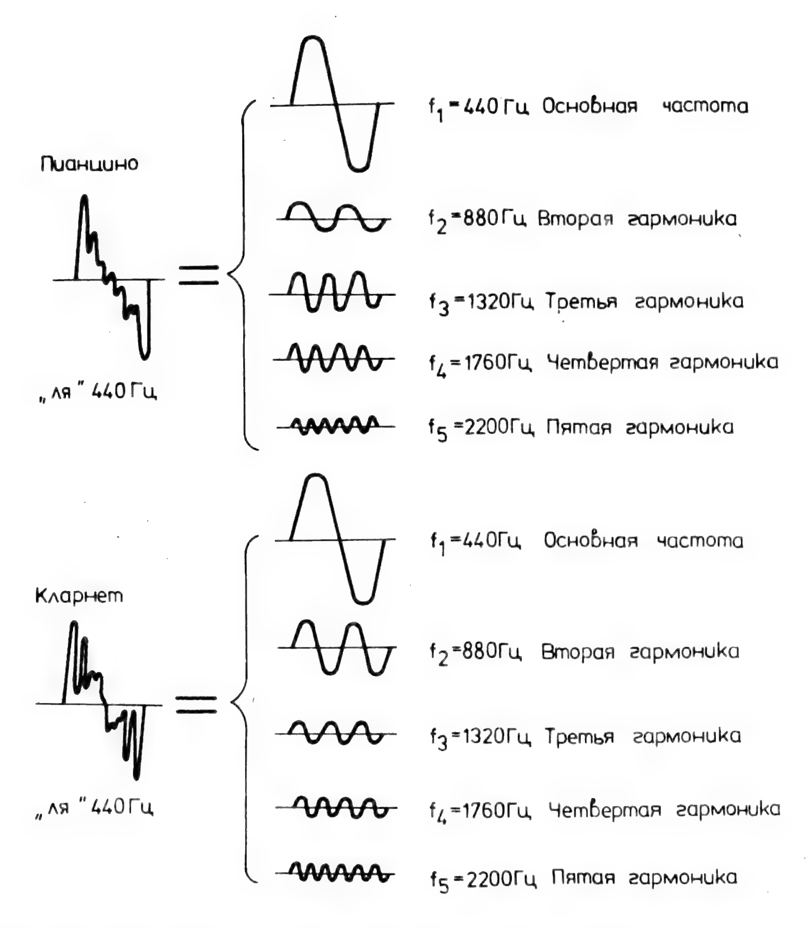


Рис. 12.8. Частотный спектр тона „ля“, издаваемого пианино и кларнетом

большого числа других синусоидальных колебаний, обладающих соответственно частотами $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$ и т. д. более высокими и кратными основной, которые называются *гармониками*. В акустике это теорема Фурье. Например, тон „ля“ пианино, который периодичен, но несинусоидален (рис. 12.8.), в сущности, состоит из следующих синусоидальных составляющих: основное колебание частотой $f_1=440$ Гц, вторая гармоника частотой $f_2=2f_1=880$ Гц, третья гармоника частотой $f_3=3f_1=1320$ Гц, четвертая гармоника частотой $f_4=4f_1=1760$ Гц и т. д. Тон „ля“ кларнета имеет гармоники той же частоты, но с другими амплитудами (сравните вторые и третьи гармоники на рис. 12.8), и поэтому „окраска“ (тембр) звуков пианино и кларнета не одинакова. Следовательно, можем сказать, что *тембр определяется величиной амплитуд отдельных гармоник*.

Теоретически число гармоник бесконечно велико. Однако практика показывает, что *с увеличением порядкового номера* гармоник, как правило, *их амплитуда уменьшается* (рис. 12.8). Поэтому при анализе звуков достаточно учесть только первые 5 или 7 гармоник, а остальными можно пренебречь.

Человеческая речь состоит из гласных и согласных звуков. Каждый звук представляет собой сложное несинусоидальное колебание, которое состоит из определенного числа синусоидальных колебаний различной часто-

ты. То же самое можно сказать о человеческом голосе (бас, тенор, меццо-сопрано, сопрано), который представляет собой сложные периодические, но несинусоидальные колебания.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

а) и наиболее сложное периодическое несинусоидальное колебание можно представить как сумму синусоидальных колебаний;

б) сложные колебания состоят из значительного числа гармоник, т. е. представляют собой определенный частотный спектр.

12.6. Частотный спектр

Благодаря наличию гармоник, частотный спектр человеческого голоса и музыкальных инструментов *значительно шире, чем их основной диапазон*. Например, на рис. 12.4 видно, что основной диапазон сопрано от 247 до 1319 Гц, однако, пятая гармоника его наивысшего тона имеет частоту 5 . 1319 = 6595 Гц, а седьмая 7 . 1319 = 9233 Гц.

Исходя из этого, данная радиоаппаратура для *качественного* воспроизведения звука должна иметь возможность усиливать равномерно весь частотный спектр— от 50 до 15 000 Гц.

Сделать такую аппаратуру не так уж просто. Поэтому радиолюбительские устройства чаще всего усиливают более узкие диапазоны — например от 200 до 8000 Гц.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Вокруг любого колеблющегося тела образуются звуковые волны, которые распространяются в воздухе со скоростью около 340 м/с.**
2. **Звук определенной частоты называется тоном. Чем выше частота колебаний, тем выше тон. Человеческое ухо может воспринять звуки частотой от 16 до 20 000 Гц.**
3. **Данный звук тем сильнее, чем больше амплитуда колебаний. Сила звуков, которые мы слышим, измеряется в децибелах.**
4. **Звуки человеческого голоса и музыкальных инструментов — сложные. Они состоят из основного колебания и большого числа гармоник, амплитуды которых определяют тембр звука.**
5. **Благодаря наличию гармоник частотный спектр человеческого голоса и музыкальных инструментов намного шире их основного диапазона.**

---

13 Электроакустические преобразователи

13.1. Микрофон

Каждый из нас говорил по телефону и знает, что здесь „носителем звука" является электрический ток. *Преобразование звука в электрический ток происходит при помощи микрофона.* На рис. 13.1*а* показан „домашний" телефон, который можно сделать самостоятельно. Он состоит из угольного микрофона, плоской батарейки, телефонного капсюля и проводов.

Угольный микрофон представляет собой металлическую коробку, заполненную мелкими графитовыми зернами (рис. 13.1*б*). На лицевой части коробки закреплена металлическая мембрана,которая упирается в зерна,но, изолирована от корпуса. Когда на микрофон не подается звук, в цепи протекает *постоянный ток* (рис. 13.1*г*, участок *А—Б*). Когда звук подается, мембрана микрофона колеблется, нажимая то сильнее, то слабее на графитовые зерна. При сильном давлении зерна оказывают малое сопротивление, и ток в цепи становится сильнее, при слабом давлении на зерна их сопротивление значительнее, а ток в цепи слабее. В результате ток в цепи изменяется так же, как и колебания звука (рис. 13.1*г*, участок *Б—В*). Такой ток называется еще *током звуковой частоты* или *низкочастотным током*.

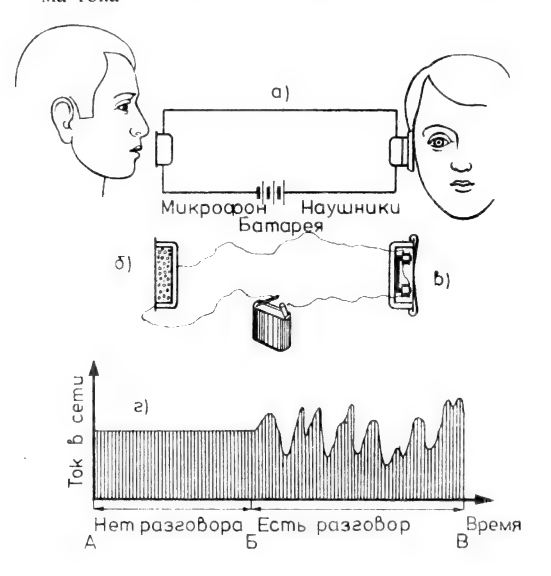
Обратите внимание на то, что угольный микрофон сам по себе не является источником напряжения звуковой частоты, а при наличии звука он изменяет свое сопротивление, изменяя тем самым и ток, поступающий от батарейки. Следовательно, для нормальной работы угольного микрофона необходимо, чтобы по нему протекал определенный ток, чаще всего величиной от 1 до 50 мА.

Кроме угольных, существуют и другие виды микрофонов, например, электродинамический, конденсаторный, пьезоэлектрический и пр. Эти микрофоны не нуждаются в питании, т. е. когда на них подается звук, на их выходе появляется ЭДС звуковой частоты.

Одно из основных требований к любому микрофону — *правильное преобразование звука*, т. е. электрические колебания, полученные на выходе, должны полностью соответствовать звуковым колебаниям. Кроме того, микрофон должен преобразовывать одинаково низкие (50—200 Гц), средние (200—2000 Гц) и высокие (2000—8000 Гц) звуковые колебания.

Другое требование, предъявляемое к любому микрофону, — это его *чувствительность*. Из двух микрофонов, на которые подается звук одина-

Рис. 13.1. *а*) простейшие телефоны с двумя наушниками и батареей; *б*) угольный микрофон; *в*) телефонный наушник; *г*) временная диаграмма тока



ковой силы, более чувствительным будет тот, на выходе которого получится бо́льшее звуковое напряжение.

Переменные напряжения, получаемые на выходе микрофонов, вообще малы, порядка 1—50 мВ. Поэтому микрофоны подключают к электронным усилителям, которые многократно увеличивают эти напряжения.

Еще один важный параметр микрофона — его *внутреннее (выходное) сопротивление.* Его надо знать при согласовании микрофонов с усилительными каскадами. Например, угольный микрофон низкоомный, а пьезоэлектрический — высокоомный.

13.2. Головной телефон (наушники)

Телефон (или телефонный капсюль) преобразует низкочастотные токи в звук. Он состоит из постоянного магнита, на полюсах которого помещены две катушки (рис. 13.2). Над полюсами закреплена тонкая металлическая мембрана. Когда протекает *постоянный ток*, электромагнит притягивает мембрану, которая не колеблется и не издает звука. Если протекает *переменный ток*, мембрана притягивается с различной силой, т. е. она колеблятся и издает звук.

С первого взгляда кажется, что постоянный магнит в телефоне не нужен. Однако, если размагнитить телефон, то он видоизменяет звук и воспроизводит его очень слабо.

В радиолюбительской практике часто используется головной телефон или наушники, состоящие из двух телефонов, катушки которых соединены последовательно (рис. 13.2). На эти катушки наматывается очень тонкая проволока диаметром 0,05 мм и чаще всего их общее сопротивление 4000 Ом. Такие наушники имеют большую чувствительность и реагируют на ничтожные напряжения и токи (милливольты и микроамперы).

В телефонных аппаратах используются единичные *телефонные капсюли.* Они низкоомны (сопротивлением 50—200 Ом) и используются при сборке любительских транзисторных приемников, зуммеров и пр.



Рис. 13.2. Радионаушники

13.3. Громкоговорители

Наиболее распространенные громкоговорители — электродинамические. Они состоят из бумажной конусной *мембраны*, в центре которой закреплена катушка (шпулька). Эта катушка содержит от 40 до 100 витков эмалированного провода диаметром 0,15—0,40 мм. Катушка помещена между полюсами *сильного магнита* (рис. 13.3 и 13.4).

Чтобы разобраться в действии громкоговорителя, припомним одно важное явление в электротехнике: *если в магнитное поле помещен проводник, по которому протекает ток, то на проводник действует определенная сила.* Направление этой силы определяется *правилом левой руки* (рис. 13.5), которое гласит: если магнитные силовые линии пронизывают ладонь, а пальцы показывают направление тока, то большой палец указывает направление действующей силы. Из этого правила следует, что механическая сила перпендикулярна как магнитному полю, так и проводнику, по которому протекает ток. (Это явление лежит в основе действия электродвигателей, электроизмерительных инструментов и т. д.).

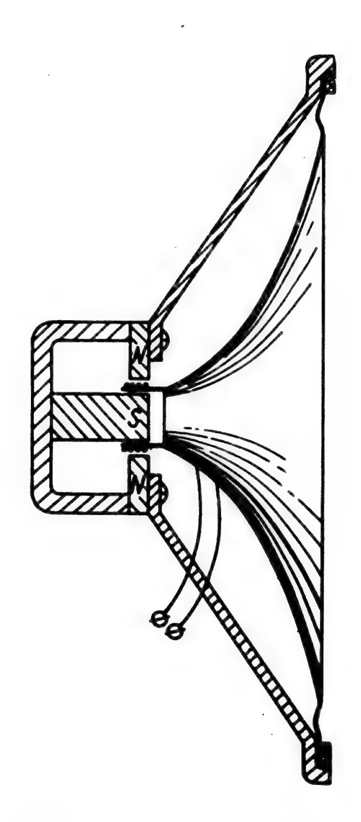


Рис. 13.3. Электродинамический громкоговоритель

Если применить вышеприведенное правило к катушке, учитывая магнитное поле в воздушном промежутке (рис. 13.5), то мы убедимся, что при протекании переменного тока катушка вместе с мембраной будет двигаться вперед и назад и воспроизводить звук.

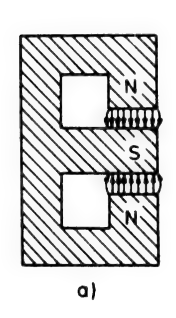
Чем больше воспроизводимый звук совпадает по форме с протекающим через катушку переменным током, тем лучше качество громкоговорителя. В связи с этим надо добавить, что, в принципе, громкоговорители бóльших размеров являются более высококачественными.

Важнейшие параметры громкоговорителей

а) Номинальная мощность. Это наибольшая электрическая мощность при переменном токе, которую допустимо подавать на громкоговоритель. Наиболее широко используемые громкоговорители имеют мощность 0,1; 0,5; 2; 3; 6 и 8 Вт, однако, производятся и большие громкоговорители мощностью 30, 50 и более ватт. Надо добавить еще, что коэффициент полезного действия (КПД) громкоговорителей не превышает 10%, т. е. при подаваемой электрической мощности в 1 Вт, получаемая звуковая мощность не более 0,1 Вт.

б) Сопротивление катушки. Это, в сущности, комплексное сопротивление катушки (импеданс) при определенной частоте. Практически его можно найти, измерив активное сопротивление катушки индуктивности и умножив его на 1,25. Наиболее часто используемые громкоговорители имеют комплексное сопротивление 2÷8 Ом, но имеются и такие, у которых оно достигает значения 100 Ом. Например, если громкоговорители имеют мощность 1 Вт и комплексное сопротивление катушки

Рис. 13.4. *а*) разрез постоянного магнита; *б*) вид спереди постоянного магнита



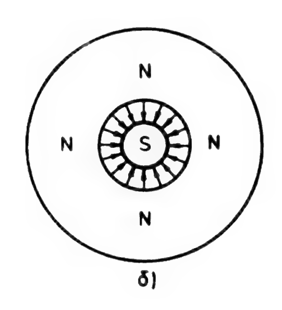
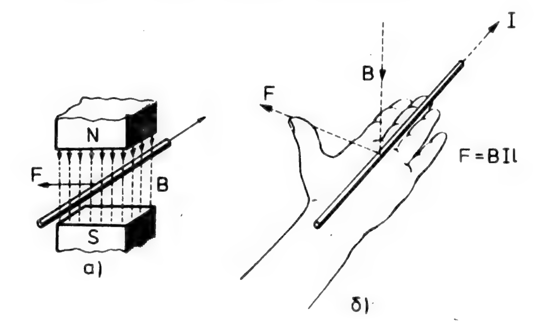


Рис. 13.5. *а*) действие магнитного поля на проводник с током; правило левой руки



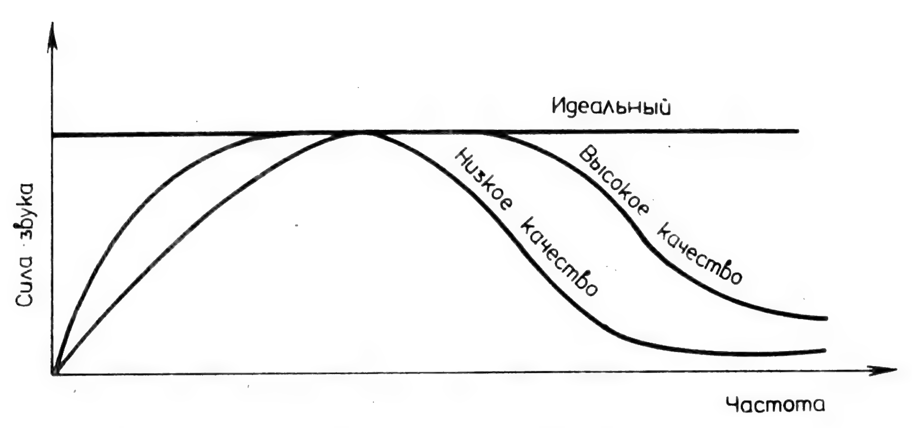


Рис. 13.6. Частотные характеристики различных громкоговорителей

индуктивности 4 Ом, то в номинальном режиме (т. е. при сильном звуке) на катушку должно действовать переменное напряжение с действующим значением 2 В, а протекающий ток должен иметь величину 0,5 А.

в) Воспроизводимая полоса частот. Идеальным громкоговорителем считается тот, который воспроизводит одинаково сильно сигналы низких, средних и высоких звуковых частот (при условии, что подаваемые электрические колебания имеют одну и ту же амплитуду). *В реальных громкоговорителях низкие и высокие частоты воспроизводятся слабее, чем средние* (рис. 13.6). Полоса частот громкоговорителя ограничивается теми частотами, при которых воспроизведение уменьшается на 30% относительно средних частот. Обычные громкоговорители имеют полосу частот от 80 до 8000 Гц, а высококачественные — от 50 до 12 000 Гц.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Микрофоны преобразуют звуковые колебания в переменные электрические напряжения. На выходе микрофона эти напряжения очень малы, порядка 1÷50 мВ, и их надо усиливать.**
2. **Наушники являются очень чувствительным преобразователем электрических колебаний в звук, так как реагируют на ничтожные напряжения и токи.**
3. **Основные параметры громкоговорителей: номинальная мощность, сопротивление катушки индуктивности и воспроизводимая полоса звуковых частот.**
4. **В номинальном режиме на катушку индуктивности электродинамического громкоговорителя действует переменное напряжение 1÷ В и протекает ток 0,1÷0,5 А.**

14 Радиовещание

14.1. Радиостудия

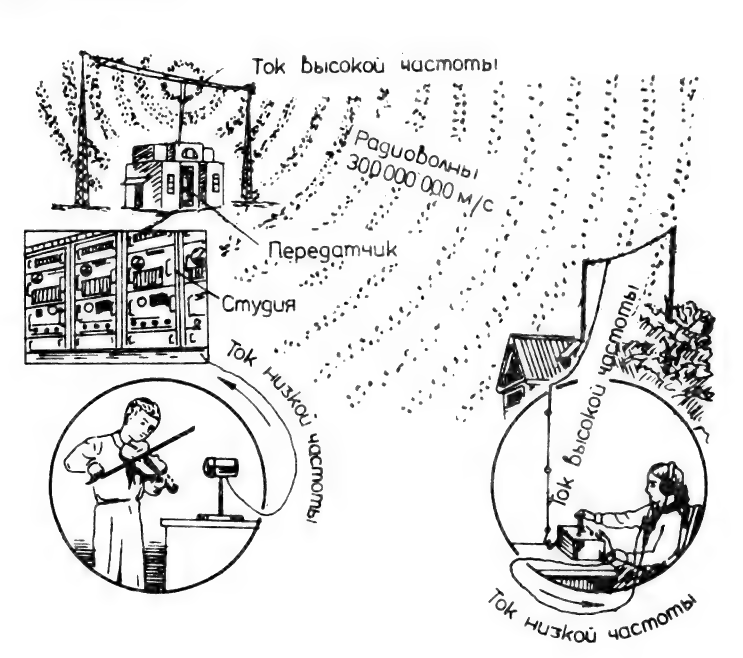
Студия гражданского радиовещания состоит из нескольких помещений, оборудованных сложной аппаратурой. В одном из них находится микрофон, при помощи которого *звуковые колебания превращаются в низкочастотные напряжения* (рис. 14.1). После усиления специальным усилителем эти напряжения подаются к радиопередатчику.

14.2. Радиопередатчик

Мощные радиопередатчики представляют собой сложные устройства. Основное звено любого передатчика — *автогенератор* (задающий генератор), который производит первоначальные *электрические колебания высокой частоты*. Автогенератор — маломощное устройство, и основное требование к нему — *стабильность* производимых колебаний.

При помощи специальных умножительных каскадов (т. н. удвоителей, утроителей) частота колебаний автогенератора увеличивается и после соответствующего усиления подается на *модуляторный каскад*. Здесь производится своеобразное „смешивание" этих в. ч. колебаний со звуковыми электрическими колебаниями, идущими из студии. В результате этого на выходе модуляторного каскада получаются *высокочастотные амплитудно-модулированные колебания* (рис. 14.2). Они имеют высокую частоту, а их амплитуда изменяется в такт со звуковой час-

Рис. 14.1. Принцип радиосвязи



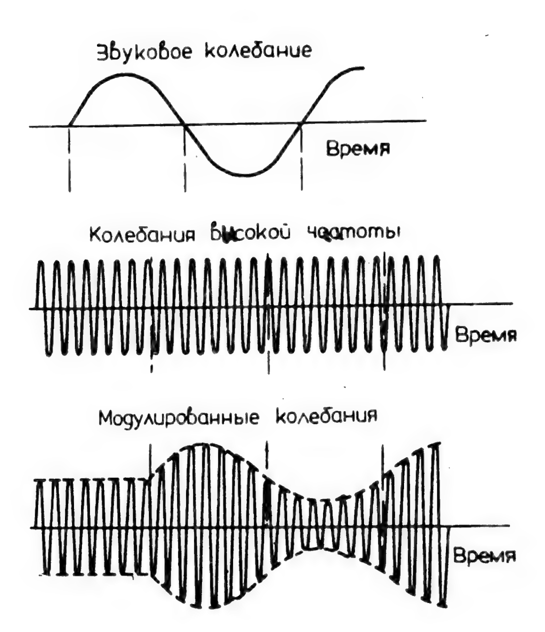


Рис. 14.2. Модуляция высокочастотного колебания

тотой. Эта модуляция называется амплитудной и является наиболее распространенной в радиовещании на коротких, средних и длинных волнах. На практике используются и другие виды модуляции — частотная, импульсная и т. д.

Полученные таким образом в. ч. модулированные колебания подаются на оконечный каскад, который является *усилителем мощности,* т. е. здесь токи и напряжения значительны и в зависимости от мощности передатчика имеют соответственно величину $1 \div 10$ А и $5000 \div 15\,000$ В.

При помощи специального кабеля, называемого *фидером,* мощные в. ч. колебания подаются на антенну (рис. 14.1).

14.3. Передающая антенна

Обычно передающие антенны представляют собой металлические мачты или натянутые провода, изолированные от земли (рис. 14.1). Во время работы в антенне протекает модулированный в. ч. ток. Из электротехники мы знаем (см. рис. 10.4), что если по проводнику протекает переменный ток, то вокруг него создается электромагнитное поле. Поэтому вокруг передающей антенны *тоже образуется переменное электромагнитное поле, которое распространяется в окружающем пространстве.* При этом принимаются специальные меры (например, настраивают антенну), чтобы бóльшая часть подаваемой электрической энергии излучалась в окружающее пространство. В некоторых случаях антенна имеет сложную конструкцию (состоит из нескольких антенн) для того, чтобы излучение было наиболее интенсивным только в определенном направлении.

14.4. Радиоволны

Переменное электромагнитное поле антенны, которое распространяется в окружающем пространстве, называется *радиоволнами.* Эти волны распространяются в атмосфере и вне ее со скоростью около 300 000 км/с. Каждый радиопередатчик излучает радиоволны строго определенной длины или, как говорится, *работает на строго определенной частоте* (т. н. несущая частота), на которой другой близлежащий радиопередатчик не должен работать. На рис. 14.3 показаны несущие частоты средневолнового радиопередатчика София I и соседних с ним по частоте

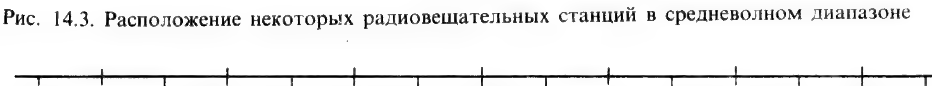
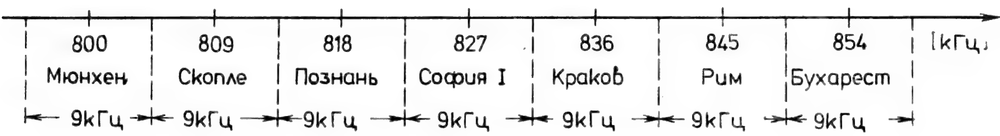


Рис. 14.3. Расположение некоторых радиовещательных станций в средневолном диапазоне



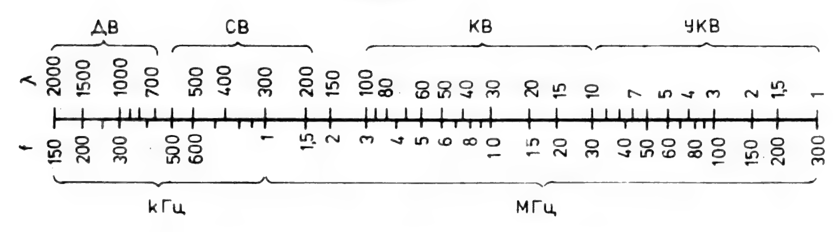


Рис. 14.4. Номограмма для перевода частоты в длину волны и обратно

передатчиков. Как видно из рисунка, каждому передатчику предоставлена не только одна несущая частота, *а целая полоса частот*, которая в передатчиках с амплитудной модуляцией имеет ширину 9 кГц. Причина в том, что амплитудно-модулированные колебания (рис. 14.2) — сложные колебания, которые состоят из целого спектра колебаний общей шириной полосы 9 кГц, а в середине этого спектра находится несущая частота передатчика.

В зависимости от длины радиоволны имеют свои особенности и законы распространения. Поэтому они разделены условно на следующие диапазоны:

Длинные волны — $f = 150 \div 450$ кГц ($\lambda = 2000 \div 670$ м).

Средние волны — $f = 500 \div 1600$ кГц ($\lambda = 600 \div 190$ м).

Короткие волны — $f = 3 \div 30$ МГц ($\lambda = 100 \div 10$ м).

Ультракороткие волны — $f = 30 \div 30\,000$ МГц ($\lambda = 10 \div 0{,}01$ м).

Приведение длины волны к частоте и обратно производится по формуле:

$$f_{\text{кГц}} = \frac{300\,000}{\lambda_m}. \qquad (14.1)$$

Пример. Несущая частота Радио София I$f = 827$ кГц. Найти длину волны. По формуле (14.1) находим:

$$\lambda_m = \frac{300\,000}{f_{\text{кГц}}} = \frac{300\,000}{827} = 362 \text{ м}.$$

Для грубых вычислений при превращении частоты в длину волны и обратно можно использовать номограмму, данную на рис. 14.4.

14.5. Распространение радиоволн

Радиоволны различной длины распространяются по-разному.

Для того, чтобы понять это, рассмотрим рис. 14.5, где показан земной шар и передающая антенна в увеличенном виде. На высоте от 40 до 500 км над Землей находится *ионосфера*. Она состоит из очень разреженных воздушных частиц, *которые под действием солнечной радиации ионизированы*. Степень этой ионизации зависит от многих факторов: день, ночь, лето, зима и т. д., которые влияют на прохождение радиоволн. Например, днем концентрация ионов больше и в ионосфере формируется несколько слоев, а ночью концентрация уменьшается, и эти слои выражены слабее. Главное свойство ионосферы — это возможность, благодаря наличию заряженных частиц, *отражать* радиоволны определенной длины волны.

Длинные волны сильно поглощаются ионосферой и поэтому основное значение имеют приземные волны, которые распространяются, огибая землю. Поскольку они распространяются в низких и плотных слоях атмосферы, их интенсивность уменьшается сравнительно быстро по мере удаления от передатчика. Поэтому длинноволновые передатчики должны иметь большую мощность.

Средние волны днем сильно поглощаются ионосферным слоем D и

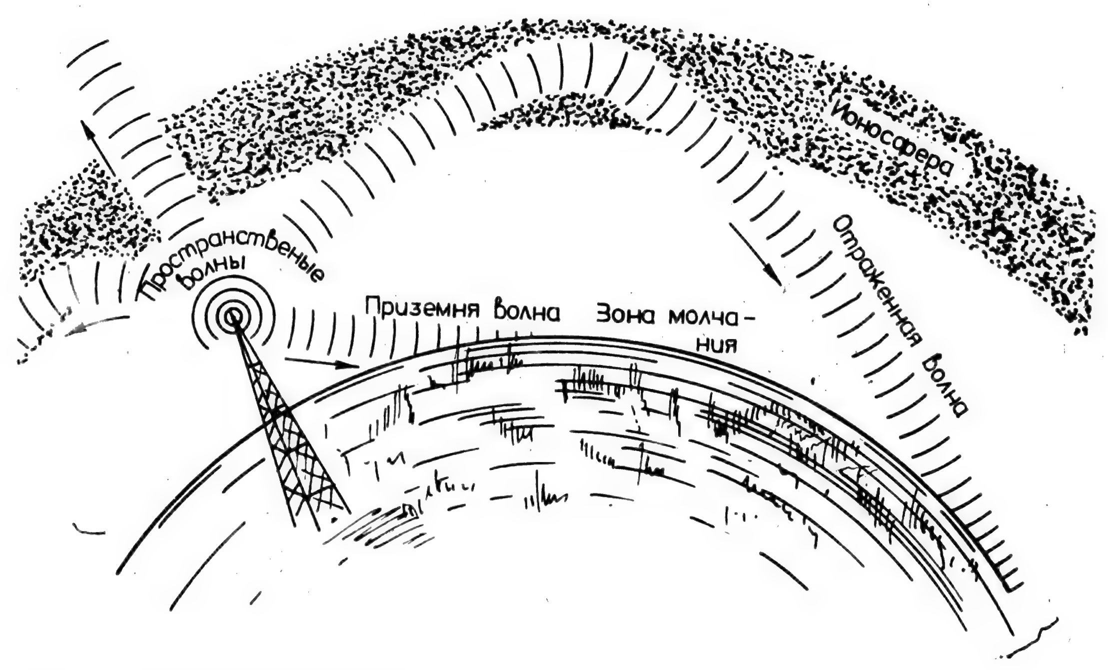


Рис. 14.5. Распространение радиоволн

район действия определяется только приземной волной. Вечером однако они хорошо отражаются ионосферой и район действия определяется отраженной волной (рис. 14.5). Поэтому средневолновые передатчики принимаются вечером лучше и дальше, чем днем.

Короткие волны распространяются исключительно посредством отражения ионосферой, поэтому около передатчика существует т. н. *зона молчания* (рис. 14.5). Короткие волны могут распространяться на большие расстояния при малой мощности передатчика. Например, в подходящее время суток с помощью любительского коротковолнового передатчика мощностью 50 Вт по телеграфному коду можно установить прочную связь между Болгарией и Австралией. Добавим еще, что днем лучшее прохождение имеют „наиболее короткие“ короткие волны (напр. 21 и 28 МГц), а ночью лучше распространяются „более длинные“ короткие волны (напр. 3,5 и 7 МГц). По этой причине *любительские КВ передатчики, как правило, работают на нескольких диапазонах*, т. е. в зависимости от обстоятельств могут работать на различных частотах, определяемых международной конвенцией для радиолюбительской деятельности.

Ультракороткие волны распространяются только по прямой (как свет) и, как правило, не отражаются ионосферой. Поэтому передающие антенны для УКВ монтируются на специальных башнях, построенных на соответствующих высотах. На УКВ диапазоне работают телевидение, радиотелефоны, пункты скорой помощи, машины такси и пр., имеющие район действия 10÷50 км.

14.6. Паразитные помехи

Рассмотренные в предыдущих параграфах радиоволны, излучаемые передатчиками, можно назвать „полезными“, потому что они являются носителями какой-то полезной информации. Вместе с ними, однако, существуют „паразитные радиоволны“, излучаемые раз-

личными источниками, как: молнии, трамваи, троллейбусы, электросварочные аппараты, неисправные электробытовые приборы и т. д., которые создают помехи в радиоприемных устройствах. Паразитные источники излучают сигналы *преимущественно в диапазоне длинных волн.* Поэтому прием на коротких волнах более чистый.

Однако на коротких волнах наблюдается неприятное явление **фединг** (замирание), которое состоит в том, что время от времени сигналы уменьшают свою интенсивность и даже пропадают на короткое время, после чего снова появляются. Причиной замирания является интерференция отраженных волн различных фаз. Эффект этого неприятного явления можно уменьшить путем использования различных средств, таких как антифединговые антенны, автоматическая регулировка усиления (АРУ) и пр.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **В радиостудии каждого передатчика имеется микрофон, преобразующий звуковые колебания в электрические. После соответствующего усиления эти н. ч. колебания подаются на радиопередатчик.**
2. **Каждый радиопередатчик имеет автогенератор, который производит первоначальные электрические колебания высокой частоты. В модуляторе эти колебания смешиваются с н. ч. колебаниями, поступающими из студии, и таким образом получаются в. ч. модулированные колебания, которые после соответствующего усиления мощности подаются на передающую антенну.**
3. **В каждой передающей антенне протекает высокочастотный модулированный ток, и вокруг нее образуются и распространяются в окружающем пространстве радиоволны. В зависимости от длины волны различаем длинные, средние, короткие и ультракороткие волны.**
4. **На высоте от 40 до 500 км от поверхности Земли находится ионосфера, в которой разреженные частицы воздуха ионизированы солнечной радиацией. Основным свойством ионосферы является ее способность отражать некоторые радиоволны и возвращать их обратно на землю.**
5. **Различные волны распространяются на дальние расстояния различным образом. Короткие волны, как и средние волны в вечернее время, покрывают дальние расстояния с отражением ионосферой. Длинные волны распространяются в основном не отраженной, а приземной волной, огибая Землю, а ультракороткие волны (как и свет) распространяются только по прямой линии, не огибая препятствий и, как правило, не отражаясь ионосферой.**

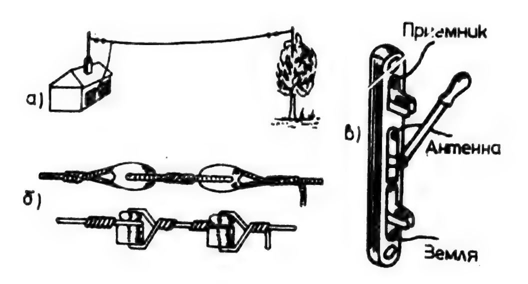
15 Радиоприем

15.1. Роль приемной антенны

В предыдущей главе мы выяснили, что передающие антенны излучают радиоволны. Эти волны распространяются в окружающем пространстве и достигают приемной антенны. Поскольку радиоволны — это *переменное электромагнитное поле,* то в приемной антенне индуктируется ЭДС той же формы и частоты, что и модулированный в. ч. ток в передающей антенне. Таким образом, в каждой приемной антенне возникает столько в. ч. напряжений различной частоты, сколько передатчиков работает в данный момент. Если данный передатчик находится близко и к тому же он мощный, то он индуктирует в антенне в. ч. напряжения порядка 10—50 мВ, в то время как напряжения, индуктированные дальними передатчиками, обычно меньше 10—100 мкВ. Чем бо́льшие напряжения вызывают в антенне волны данного передатчика, тем качественнее антенна.

Следовательно, роль приемной антенны — превращать радиоволны передатчиков в соответствующие высокочастотные напряжения.

Рис. 15.1. *а*) обычная внешняя Г-образная антенна; *б*) крепление изоляторов; *в*) соединение антенного прерывателя

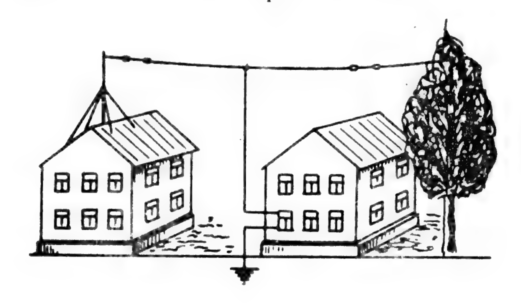


15.2. Устройство приемной антенны

Приемные антенны могут иметь различную конструкцию, т. к. в принципе, в любом проводнике, изолированном от земли, радиопередатчики индуктируют высокочастотные напряжения. Но, как уже говорилось, вопрос в том, что эти напряжения должны быть довольно значительными. А это получается, если антенна высокая, достаточно длинная и находится на открытом и высоком месте.

Внешняя приемная антенна представляет собой неизолированный многожильный медный провод (т. н. антенный провод), натянутый на определенной высоте над землей. На рис. 15.1*а* показана *Г-образная* антенна, а на рис. 15.2 — *Т-образная* антенна. Эти антенны особенно пригодны для радиолюбительской работы и поэтому вкратце ознакомимся с их конструкцией. Провод с обоих концов изолирован посредством **антенных изоляторов** (рис. 15.1*б*), а остальная часть антенны, которая соединяется с мачтой, делается из толстой оцинкованной проволоки. Напряжения, которые индуктируются в антенне, подводятся к радиоприемнику посредством снижения (вертикальной части), которое изготав-

Рис. 15.2. Внешняя Т-образная антенна



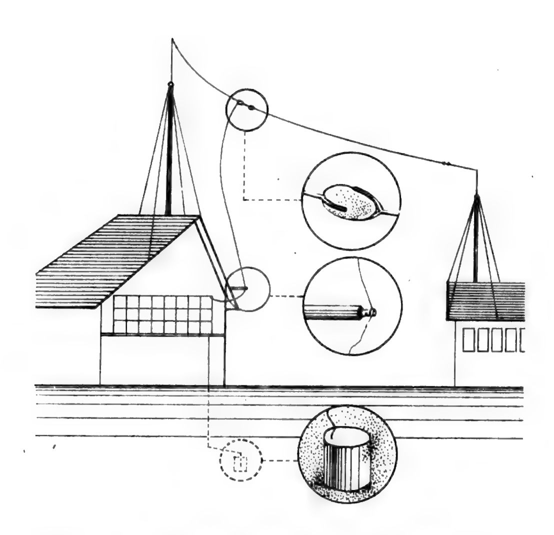


Рис. 15.3. Установка фидера и заземления

ливается из хорошо изолированного медного провода. Нижний конец вертикальной части соединен с **антенным прерывателем (грозовым переключателем** — рис. 15.*в*), который часто монтируется на внутренней стороне окна. С его помощью антенну можно заземлять для предохранения ее во время грозы от молнии. На рис. 15.1*в* видно, что в верхнем положении переключателя антенна подключена к радиоприемнику, а в нижнем — заземлена.

Рекомендуется внешние антенны делать длиной 10—20 м и монтировать их на высоте не менее 2—3 м над окружающими зданиями. В конце снова повторим, что хорошая антенна должна быть высокой, длинной и хорошо изолированной.

15.3. Заземление

Роль заземления — обеспечить замкнутую цепь для высокочастотных токов, возникающих от напряжений, индуктированных в антенне. Кроме того, *заземление уменьшает помехи и обеспечивает лучший прием дальних и слабых радиостанций.* Поэтому заземление абсолютно необходимо для детекторных радиоприемников и в радиолюбительской деятельности.

В качестве заземлителя чаще всего используются водопроводные трубы или трубы парового отопления. В качестве проводника для заземления можно использовать любой медный провод (оголенный или изолированный). Иногда заземление можно осуществить во дворе, близко к дому. Для этой цели выкапываем в земле яму глубиной 0,5—1 м, в которую закапываем металлический предмет (жестяной лист, старое ведро и пр.), прочно соединенный с проводом (рис. 15. 3). Это место рекомендуется полить ведром воды с растворенной в ней горстью поваренной соли — это улучшает проводимость почвы.

15.4. Задачи радиоприемника

Если между антенной и заземлением включить наушники, то через их катушки будут протекать высокочастотные токи различной частоты от соответствующих передатчиков. Однако мы не услышим никакого звука, поскольку наушники не реагируют на такие высокие частоты, а и ухо человека воспринимает в виде звука только такие колебания, частоты которых не превышают 20 кГц.

Для превращения антенных напряжений в речь и музыку необходим радиоприемник. Основные задачи радиоприемника:

а) Из большого числа высокочастотных напряжений, индуктированных в приемной антенне, выделять только колебания нужной радиостанции. Это свойство радиоприемика называется *избирательностью (селективностью)*.

б) Усиливать слабый сигнал нужной радиостанции во столько раз, чтобы сработал громкоговоритель. Вспомните, что хорошие радиоприемники усиливают сигнал в 10 000 ÷ 100 000 раз.

в) Из высокочастотного модулированного сигнала получать снова коле-

бания звуковой частоты. Этот процесс называется *демодуляцией.*

Радиоприемники обладают перечисленными свойствами благодаря наличию колебательных контуров, транзисторов, диодов и пр., соединенных в различные сложные электронные схемы.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Приемная антенна служит для превращения радиоволн от радиопередатчиков в соответствующие модулированные высокочастотные напряжения.**
2. **В приемной антенне индуктируется столько высокочастотных напряжений различной частоты, сколько передатчиков работают в данный момент.**
3. **Возникающие в антенне высокочастотные напряжения вообще малы: милливольты или микровольты.**
4. **Хорошая приемная антенна должна быть высокой, достаточно длинной и хорошо изолированной.**
5. **Для обеспечения качественного приема необходимо заземление. Оно уменьшает помехи и помогает принимать далекие и слабые радиостанции.**
6. **Основные задачи радиоприемника:**

   а) из большого числа высокочастотных напряжений в антенне выделять только колебания нужной частоты:

   б) усиливать слабые сигналы принимаемой радиостанции;

   в) демодулировать (детектировать) эти высокочастотные колебания.

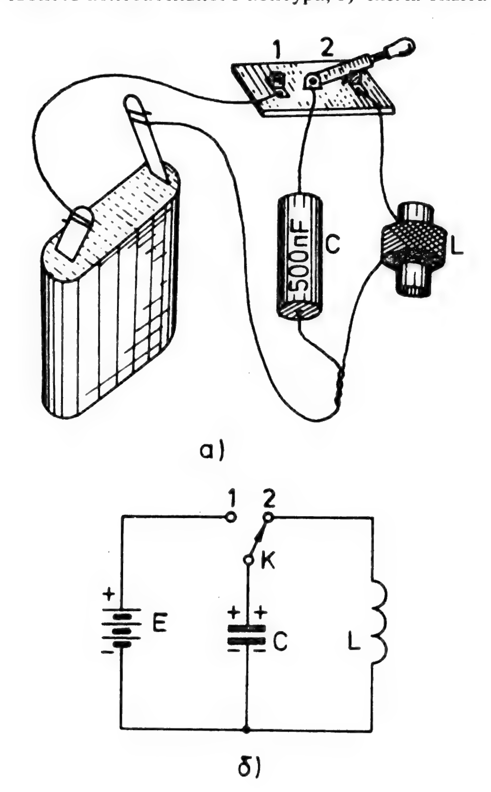
16 Колебательный контур

16.1. Общие свойства

Как уже известно, важнейшей задачей любого радиоприемника является выделение из большого количества высокочастотных колебаний, индуктируемых в антенне, только колебания нужной радиостанции. Это проще всего осуществляется при помощи *колебательного контура*. Он состоит из соединенных между собой конденсатора и катушки индуктивности.

Собственные колебания контура. Чтобы выяснить свойства колебательного контура, рассмотрим опыт, показанный на рис. 16.1. Когда ключ находится в положении *1*, конденсатор заряжается от батареи. Если ключ переключить в положение *2*, конденсатор начинает разряжаться через катушку индуктивности. Эта разрядка очень интересна, поскольку *в контуре возникают синусоидальные электрические колебания определенной частоты* (отсюда и название колебательный контур).

Рис. 16.1 *а*) постановка опыта для изучения свойств колебательного контура; *б*) схема опыта



На рис. 16.2*а* показан первый момент этого процесса, когда напряжение на конденсаторе максимально, а ток только что начал нарастать. Обратите внимание, что в этот момент вся энергия, полученная от батареи, *сосредоточена между электродами конденсатора*. На рис. 16.2*б* показан момент, когда ток достиг максимума, а напряжение на конденсаторе равно нулю. Следовательно, здесь *энергия конденсатора превратилась в магнитную энергию поля вокруг катушки индуктивности*. С этого момента ток начинает уменьшаться, и магнитные силовые линии начинают „собираться" к катушке и вызывают в ней ЭДС самоиндукции. Как уже известно (см. гл. 10), направление этой ЭДС таково, что оно „помогает" уменьшающемуся току. Поэтому ток, вызванный „сужающимся" магнитным полем катушки индуктивности, продолжает протекать в том же направлении, заряжая снова конденсатор, но на этот раз с противоположной полярностью. Именно этот момент показан на рис. 16.2*в*, когда конденсатор заряжен противоположной полярностью, и ток в цепи уже прекратился, т. е. *магнитная энергия катушки индуктивности превратилась снова в электрическую энергию заряженного конденсатора*. В следующий момент конденсатор начинает снова разряжаться через катушку индуктивности. На рис. 16.2*г* он уже полностью разрядил-

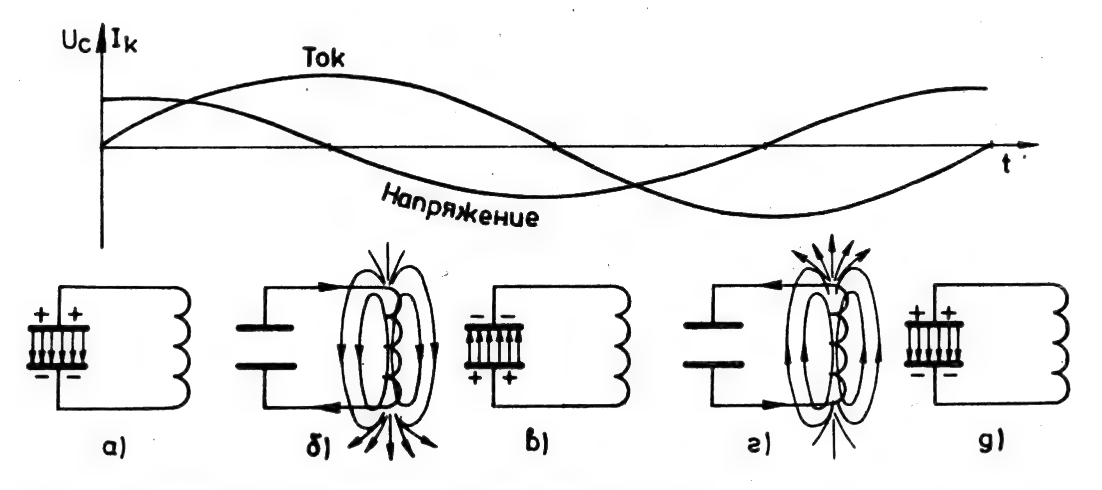


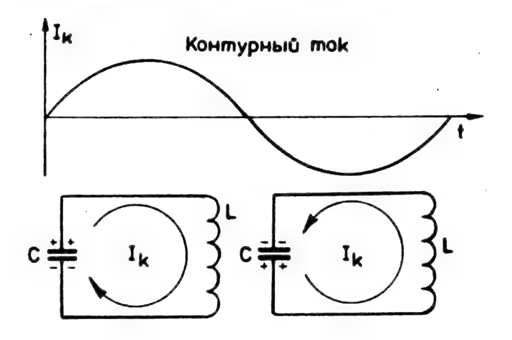
Рис. 16.2. Изменение тока и напряжения в колебательном контуре

ся, и ток максимален. Далее магнитное поле опять „сужается“ к катушке индуктивности и ток продолжает протекать в том же направлении, пока конденсатор снова не зарядится первоначальной полярностью (рис. 16.2*г*).

Описанные электрические колебания представляют собой, по существу, *контурный ток*, изменяющийся *по синусоидальному закону* (рис. 16.3). Он является результатом периодического превращения электрической энергии конденсатора в магнитную энергию катушки индуктивности и обратно.

Если контур идеален (без потерь), то колебания будут незатухающими, т. е. будут продолжаться вечно. *В реальных колебательных контурах колебания затухают* тем быстрее, чем

Рис. 16.3. В первый полупериод ток в колебательном контуре течет в одном направлении, а во второй полупериод — в другом



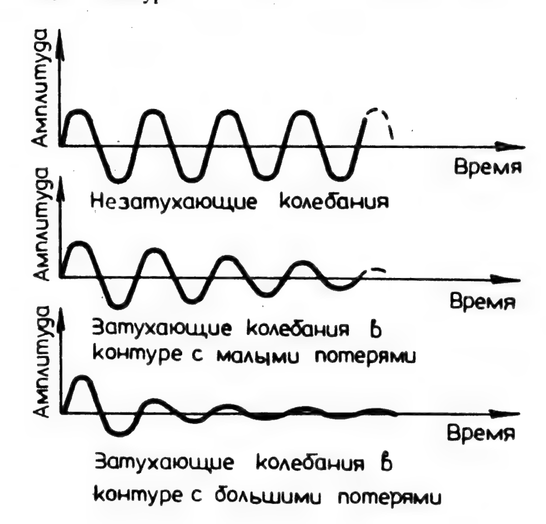
бо́льшие потери имеет этот контур (рис. 16.4).

Частота собственных колебаний контура. Частота возникающих колебаний (она называется еще резонансной частотой f_p) зависит от емкости конденсатора и индуктивности катушки и вычисляется по формуле Томсона

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (16.1)$$

Из этой формулы следует, что, чем меньше индуктивность и емкость, тем

Рис. 16.4. Незатухающие и затухающие колебания в контуре



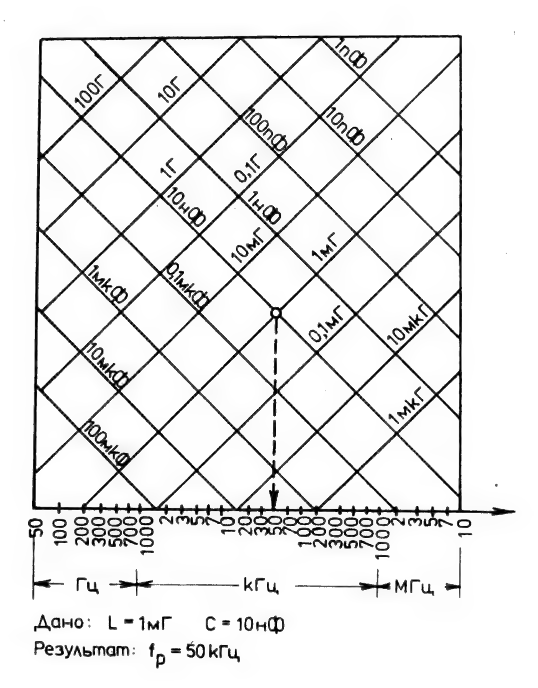


Рис. 16.5. Номограмма для определения резонансной частоты контура

выше собственная частота контура и обратно: при большой емкости и индуктивности собственная частота контура мала.

Пример 16.1. Какова частота собственных колебаний контура, если $L = 200$ мкГ, а $C = 500$ пФ?

Превращаем индуктивность в генри и емкость в фарады и подставляем в формулу (16.1)

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{200 \,.\, 10^{-6} \,.\, 500 \,.\, 10^{-12}}} \approx 500 \text{ k/Гц}.$$

Собственную частоту данного колебательного контура можно найти быстрее, используя номограмму, данную на рис. 16.5.

16.2. Электрический резонанс

Явление резонанса можно продемонстрировать дома, проделав опыт, показанный на рис. 16.6.

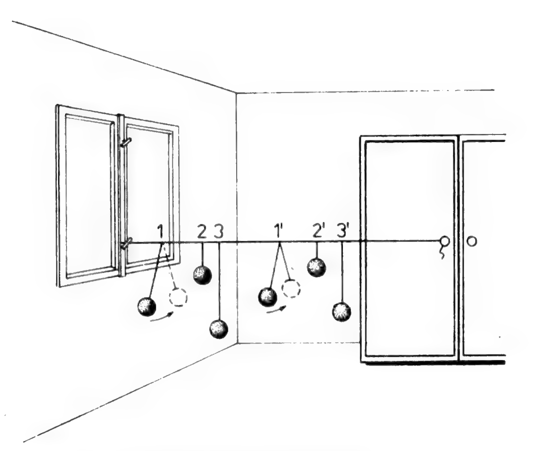


Рис. 16.6. Механический резонанс

Здесь, к натянутой веревке, прикреплены три пары шариков *1—1'*, *2—2'* и *3—3'*, каждый из которых представляет собой маятник. Если раскачать рукой шарик *1*, начинает раскачиваться и шарик *1'*, а все другие остаются неподвижными. Точно так же, если раскачать шарик *3*, начинает качаться только шарик *3'*. Это явление называется **механическим резонансом** и объясняется следующим образом. Каждый маятник имеет свою собственную частоту колебаний. В нашем случае собственная частота маятников *1* и *1'* одинакова, маятники *2* и *2'* тоже имеют одинаковую частоту собственных колебаний и т. д. При раскачивании маятника *1* его колебания передаются по веревке остальным маятникам. Однако эти колебания раскачивают только маятник *1'*, *частота собственных колебаний которого совпадает с „толчками", передающимися по веревке*. Поскольку эти толчки производятся в такт с его собственными колебаниями, амплитуда раскачивания второго маятника все больше и больше возрастает *и может стать больше амплитуды первого маятника*.

Аналогично этому и явление **электрического резонанса**. Здесь на рис. 16.7*а* показан лабораторный генератор *Г* (т. наз. сигналгенератор), с помощью которого будем подавать высокочастотные колебания различной частоты, но всегда с напряжением

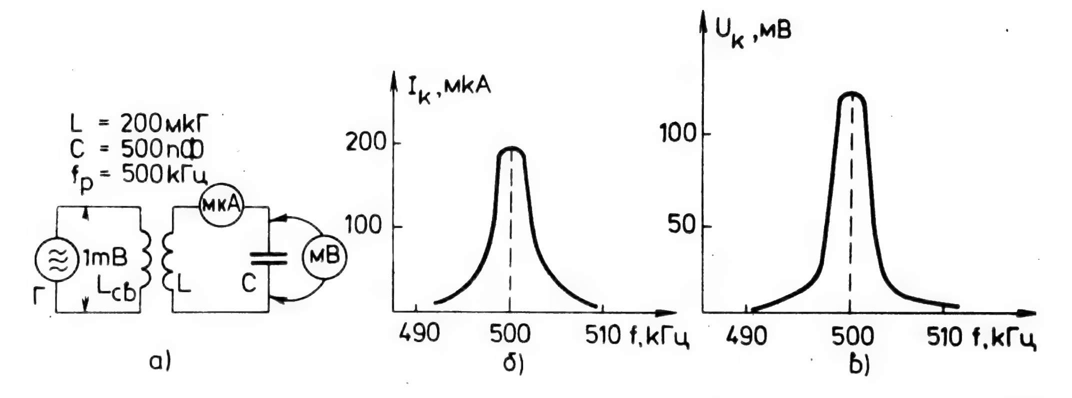


Рис. 16.7. *а*) схема опыта по электрическому резонансу; *б*) зависимость контурного тока от частоты; *в*) зависимость напряжения на конденсаторе от частоты

1 мВ. Эти колебания подаются на колебательный контур *LC* посредством индуктивной связи между катушками $L_{св}$ и *L*. К контуру подключаются приборы для измерения контурного тока и напряжения на конденсаторе. Поскольку $L = 200$ мкГ и $C = 500$ пФ, частота собственных колебаний контура равна 500 кГц (см. пример 16.1). Если от генератора начать подавать электрические колебания различной частоты (но всегда с напряжением 1 мВ), заметим, что на частоте 500 кГц контурный ток и напряжение на конденсаторе сильно нарастают, а на частотах выше и ниже 500 кГц они быстро уменьшаются. На рис. 16.7*б* и *в* это явление изображено графически, а кривые называются *частотными характеристиками колебательного контура*.

Описанное явление объясняется следующим образом. Посредством индуктивной связи в катушке *L* индуктируется переменная ЭДС, имеющая частоту генератора. В результате в контуре возникают так называемые вынужденные незатухающие электрические колебания (контурный ток) с частотой генератора. В принципе эти колебания имеют малую амплитуду, т. е. переменное напряжение на конденсаторе намного меньше напряжения генератора.

Рис. 16.8. Резонансные кривые при различной добротности

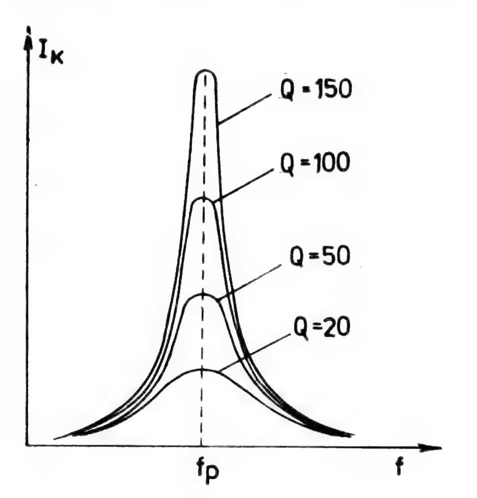
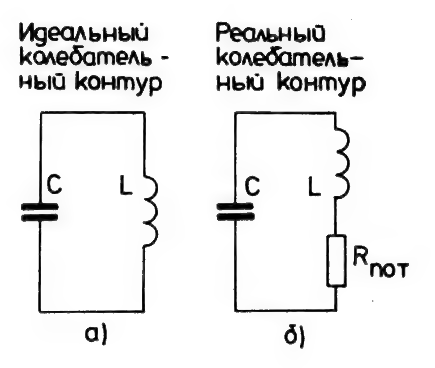


Рис. 16.9. *а*) идеальный колебательный контур имеет только емкость и индуктивность; *б*) реальный колебательный контур имеет емкость, индуктивность и сопротивление потерь



Когда частота генератора становится равной собственной частоте колебательного контура, наступает явление резонанса. Оно характеризуется тем, что контурный ток значителен, и *напряжение на конденсаторе может стать во много раз больше* (примерно в 120—150 раз) напряжения генератора. Следовательно, колебательный контур обладает так называемой частотной избирательностью и во время резонанса многократно увеличивает напряжение поданных на него колебаний. Чем больше добротность контура, тем больше выражены эти свойства (рис. 16.8). Следует отметить, что добротность контура зависит прежде всего от добротности катушки индуктивности, точнее от ее сопротивления потерь $R_{пот}$ (см. гл. 11). Поэтому иногда реальные колебательные контуры изображаются вместе с сопротивлением потерь катушки индуктивности (рис. 16.9). Чем меньше $R_{пот}$, тем выше добротность контура. Как уже известно, хорошие колебательные контуры имеют добротность от 50 до 150.

16.3. Виды колебательных контуров

В электрических схемах колебательный контур связан (непосредственно, индуктивно, емкостной связью) с каким-либо источником электрических колебаний. Этим источником может быть антенна, усилительный каскад и пр., которые в общем случае являются *генератором с определенным внутренним сопротивлением, частотой и амплитудой.* В зависимости от того, *как соединен генератор с катушкой индуктивности и конденсатором,* различают *последовательный* и *параллельный* колебательный контур.

Последовательный колебательный контур. В таком контуре генератор соединен последовательно с катушкой и конденсатором. Например, при индуктивной связи колебательный контур последовательный, потому что в катушке (рис. 16.10) индуктируется ЭДС, что равносильно последовательному включению генератора с L и C.

Во время резонанса последовательный контур характеризуется следующими особенностями:

1. Сопротивление контура *минимально* и равно $R_{пот}$.

2. Напряжение на конденсаторе (или катушке) в *Q раз больше напряжения* генератора. Здесь Q — добротность контура.

3. Ток, протекающий через контур, *максимален* и равен

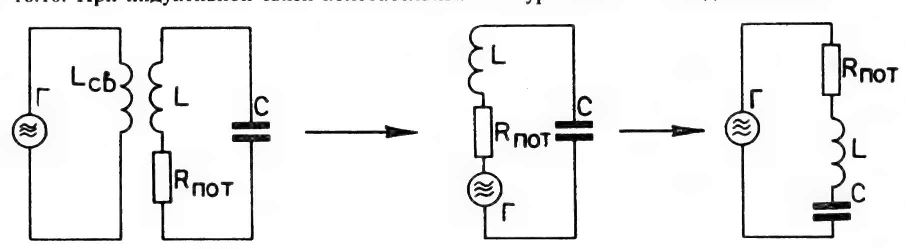
$$I_k макс = \frac{E}{R_{пот}}.$$

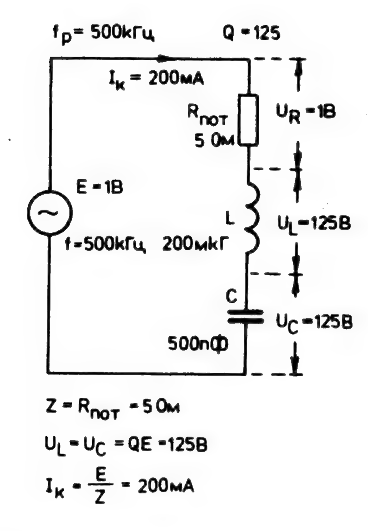
На рис.16.11 дан конкретный пример последовательного колебательного контура, а также и его частотные характеристики при условии, что внутреннее сопротивление генератора невелико.

Параллельный колебательный контур. В этом случае генератор соединен с катушкой индуктивности и конденсатором параллельно. При резонансе параллельный колебательный контур характеризуется следующими особенностями:

1. Сопротивление контура *велико* и

Рис. 16.10. При индуктивной связи колебательный контур является последовательным





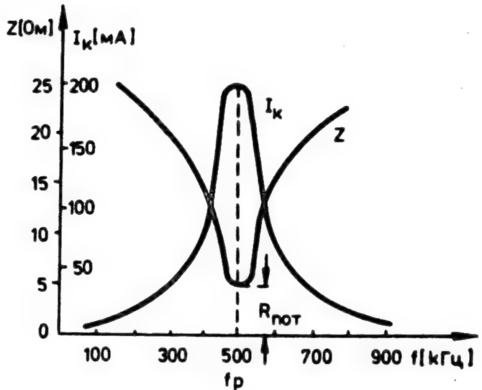
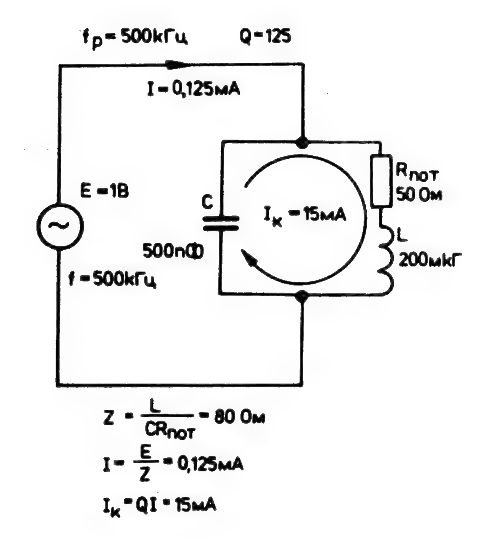


Рис. 16.11. Свойства последовательного контура



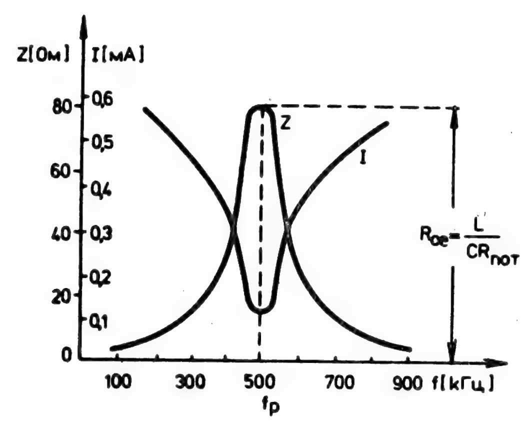


Рис. 16.12. Свойства параллельного колебательного контура

равно $\frac{L}{CR_{пот}}$. Это сопротивление иногда называется резонансным сопротивлением параллельного колебательного контура и обозначается $R_{ое}$.

2. Поскольку сопротивление контура большое, ток во внешней цепи *сравнительно мал* и равен $\frac{E}{R_{ое}}$. Контурный ток *сравнительно большой*. Он в Q раз больше тока во внешней цепи.

На рис. 16.2 дан конкретный пример параллельного колебательного контура и его частотные характеристики, полученные при условии, что внутреннее сопротивление генератора большое. В заключение надо отметить, что резонансная частота как последовательного, так и параллельного колебательного контура вычисляется по формуле Томсона.

16.4. Входное устройство с колебательным контуром

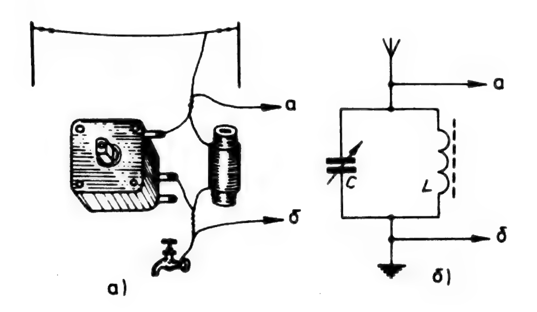
На рис. 16.13 показана непосредственная связь антенны с колебательным контуром. Здесь конденсатор переменный (см. п. 9.3) и, изменяя его емкость, мы можем изменять частоту собственных колебаний контура, т. е. настраивать его на частоту нужной ра-

диостанции. При резонансе контурный ток, вызванный нужной радиостанцией, становится относительно большим, а сопротивление контура тоже большое. В результате на обоих концах контура образуется *значительное падение напряжения только от сигнала нужной радиостанции*, а для сигналов других станций контур представляет малое сопротивление. Таким образом, между точками *а—б* (рис. 16.13) получается довольно значительное напряжение только от сигнала нужной станции.

На рис. 16.14 показана индуктивная связь антенны с контуром. Нам уже известно (рис. 16.10), что в этом случае колебательный контур последовательный. Посредством переменного конденсатора можно настраивать контур в резонанс с нужной радиостанцией. В этом случае контурный ток, вызванный этой радиостанцией, становится относительно большим, в то время как контурные токи, вызванные другими станциями, ничтожно малы. Большой контурный ток образует значительное напряжение на конденсаторе, которое от точек *а—б* (рис. 16.14) подается к следующим каскадам радиоприемника.

На рис. 16.15 показан случай, когда колебательный контур с добротностью $Q = 125$ настроен на радиостанцию София—I. Соответствующие ординаты, обозначенные пунктирными линиями,

Рис. 16.13. *а*) входное устройство приемника с параллельным колебательным контуром; *б*) схема входного устройства



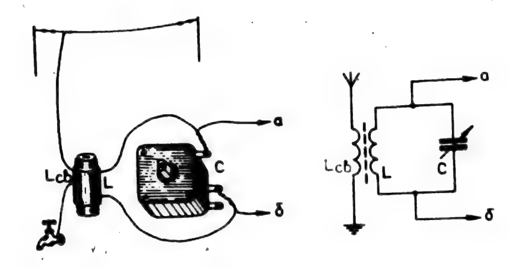
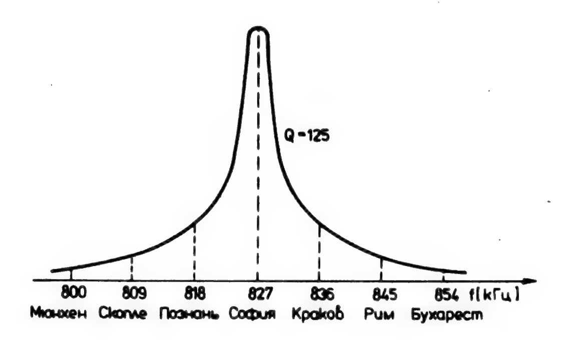


Рис. 16.14. Входное устройство приемника с индуктивной связью

показывают силу, с которой будут приниматься соседние радиостанции при условии, что в антенне индуктируются одинаковые напряжения. Но поскольку радиостанции Познань, Краков и др. находятся далеко от Болгарии, их сигналы на выходе контура будут намного слабее показанных на рисунке.

Рис. 16.15. Ослабление соседних станций с помощью колебательного контура



ЗАПОМНИТЕ!

1. При разрядке конденсатора через катушку индуктивности получаются затухающие синусоидальные колебания, частота которых может быть найдена по формуле Томсона.

2. В колебательном контуре могут быть возбуждены незатухающие колебания с помощью внешнего генератора. Если частота генератора совпадает с частотой собственных колебаний контура, наступает явление резонанс.

3. При резонансе сопротивление последовательного колебательного контура минимально, а напряжение на конденсаторе (или катушке индуктивности) в Q раз больше напряжения генератора.

4. При резонансе сопротивление параллельного колебательного контура большое, а контурный ток в Q раз больше тока во внешней цепи.

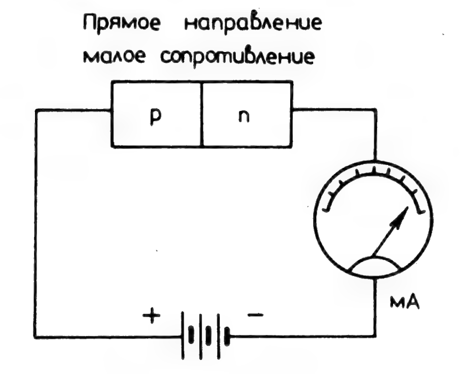
5. Резонансные свойства колебательного контура выражены тем ярче, чем выше его добротность.

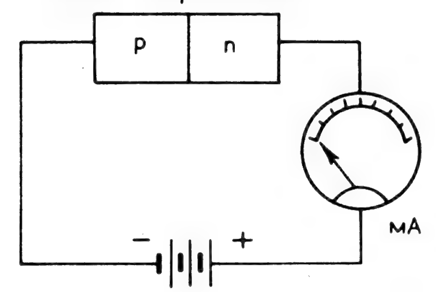
17 Полупроводниковые диоды

17.1. Полупроводники. *p—n* переход

Для производства диодов, транзисторов и пр. используют полупроводники: **кремний, германий и селен**. Они имеют кристаллическую структуру и в чистом виде обладают свойствами, подобными свойствам изоляторов. Для получения диодов и транзисторов к чистым полупроводникам добавляют *определенные примеси*. В зависимости от вида примесей могут получиться две разновидности: *p*-полупроводник и *n*-полупроводник, *которые проводят электрический ток намного лучше чистых полупроводников*. Например, из германия получают *p*-германий и *n*-германий, из кремния — *p*-кремний и *n*-кремний и т. д.

Рис. 17.1. В прямом направлении сопротивление *p-n* перехода небольшое, а в обратном направлении большое





Электрическая проводимость любого *n*-полупроводника основана на свободных электронах, т. е. она подобна проводимости металлов.

Электрическая проводимость любого *p*-полупроводника обусловлена т. н. **дырками**. Их можно рассматривать как фиктивные положительные частицы, поскольку они представляют собой места в кристаллической решетке, где отсутствуют валентные электроны.

Важнейшее свойство *p*- и *n*-полупроводников — *односторонняя проводимость в месте спайки* (рис. 17.1). Эта спайка называется ***p- n*-переходом** и производится по специальной технологии. Ширина *p- n*-перехода очень мала, от 1 до 50 мкм (напоминаем, что 1 мкм равен 1/1000 миллиметра).

Когда „плюс" источника тока соединен с *p*-областью (рис. 17.1*а*), говорят, что переход включен *в прямом направлении*. В этом случае его сопротивление *мало*, и ток в цепи может быть значительным. Когда „минус" источника тока соединен с *p*-областью (рис. 17.1*б*), переход включен *в обратном направлении*. В этом случае его сопротивление очень велико, и ток в цепи почти не протекает.

Односторонняя проводимость p- n-перехода является основой действия полупроводниковых диодов, транзисторов, тиристоров и пр.

17.2. Точечные диоды

На рис. 17.2*а* показаны три точечных диода. Они состоят из стеклянного

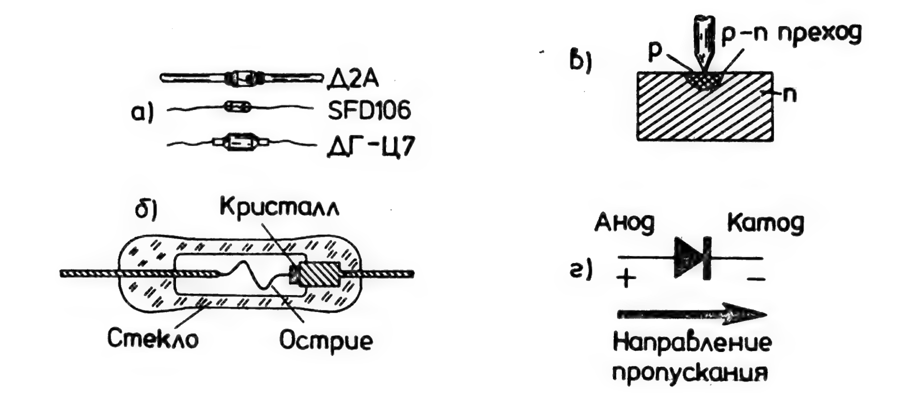
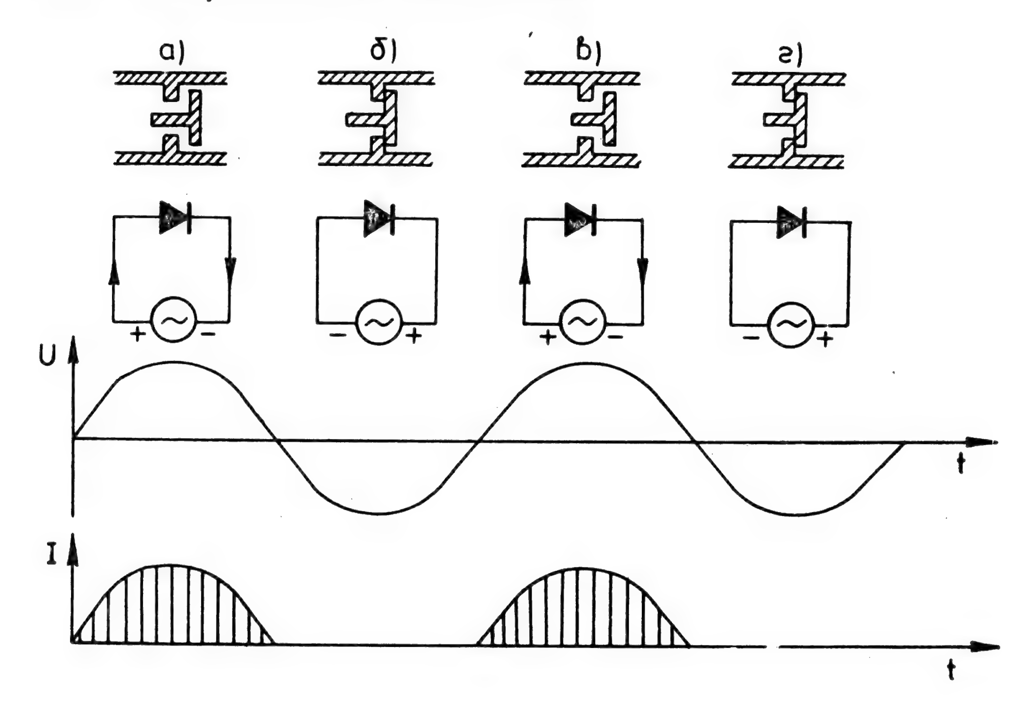


Рис. 17.2. *а*) точечные диоды; *б*) точечный диод в разрезе; *в*) в точечных диодах *p-n* переход имеет форму полусферы; *г*) диоды пропускают ток в направлении от анода к катоду

корпуса, в котором имеется тонкое острие, спаянное с германиевым или кремниевым кристаллом с *n*-проводимостью (рис. 17.2*б*). *Главным свойством диода является его односторонняя проводимость* — он пропускает ток только в направлении от острия к кристаллу, а в обратном направлении оказывает току большое сопротивление. Причиной этого является образованный при обработке *p*- *n*- переход между острием и кристаллом (рис. 17.2 *в*). Размеры перехода примерно равны одной точке, откуда и произошло название диода — точечный. Это делается для того, чтобы диоды имели минимальные межэлектродные емкости. Острие (или *p*-область) называется еще **анодом**, а кристалл (или *n*-область) — **катодом** диода.

Рис. 17.3. По своему действию диоды похожи на вентили



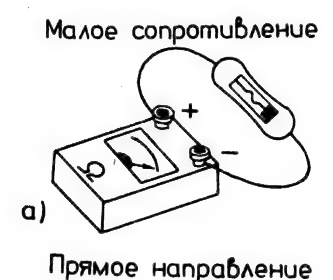


Рис. 17.4. а) в прямом направлении омметр измеряет малое сопротивление; б) в обратном направлении омметр измеряет большое сопротивление

Таким образом, *направление пропускания тока — от анода к катоду*. Это показано на рис. 17.2*г*, где дано обозначение диодов.

Односторонняя проводимость диодов называется еще *вентильным свойством*. Действительно, из рис. 17.3 видно, что если к диоду приложено переменное напряжение, диод открыт только во время положительного полупериода напряжения, так что ток через диод состоит из отдельных импульсов.

Точечные диоды предназначены для работы *в высокочастотных цепях* при сравнительно небольших напряжениях и токах. Они используются в детекторных каскадах, в электронно-вычислительных машинах, в автоматике и т. д.

Важнейшие параметры диодов:

1. Максимальный ток в прямом направлении. На практике он чаще всего имеет величину 10—50 мА.

2. Максимальное обратное напряжение. На практике оно обычно 20—60 В.

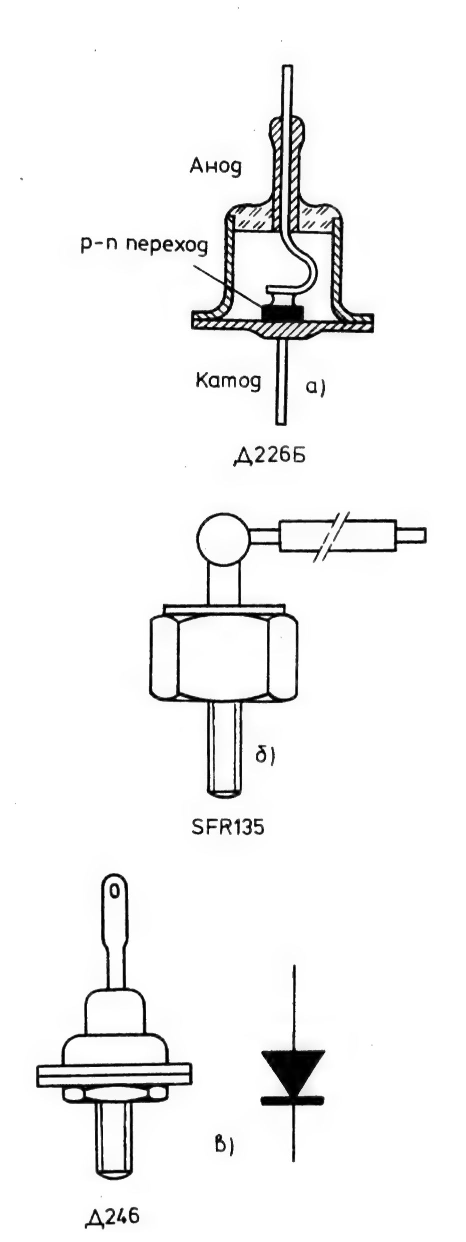


Рис. 17.5. Плоскостные диоды — выпрямители тока

Исправность точечных диодов проверяется проще всего омметром. (Следует подчеркнуть, что положительная клемма омметра связана с плюсом встроенной батареи). Как видно из рис. 7.4, в прямом направлении сопротивление точечных диодов должно быть небольшим (примерно 20—





Рис. 17.6. Проверка исправности диодов омметром

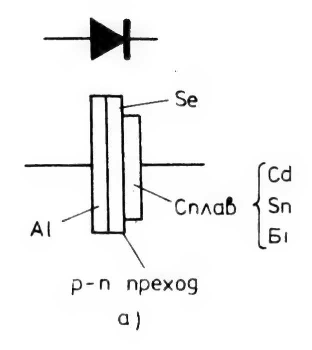
150 Ом), а в обратном направлении большим (более 100 кОм).

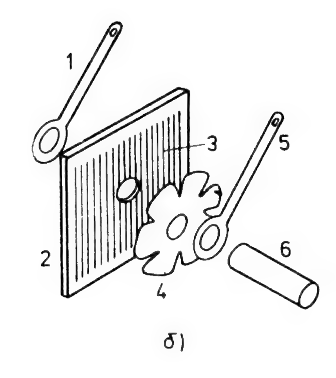
В радиолюбительской практике наиболее часто используются Д2А—Д2Е, Д9А—Д9Е и т. д.

17.3. Плоскостные диоды

В них тоже есть *p*- *n*- переход, но его площадь больше (отсюда и их название). На рис. 17.5*а* показан разрез плоскостного диода (такую конструкцию имеет, например, кремниевый диод Д226Б и германиевый Д7Ж. Здесь анодом является пластинка, спаянная с *n*-кристаллом, а он в свою очередь припаян к металлическому корпусу для улучшения теплообмена.

Основным свойством плоскостных диодов является та же самая односторонняя проводимость. Они, однако, предназначены *для выпрямления значительных токов и напряжений*. Это, со





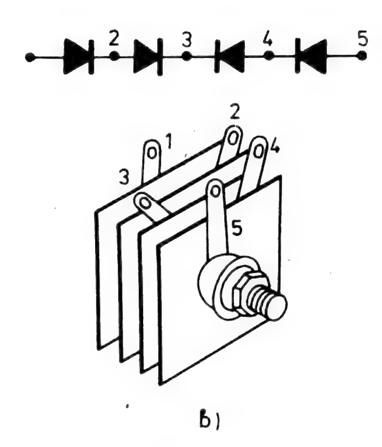


Рис. 17.7. *а*) принципиальное устройство селеновой ячейки; *б*) селеновая ячейка в разобранном виде; *в*) мостовой выпрямитель тока, состоящий из четырех селеновых ячеек

своей стороны, приводит к нагреванию во время работы. Поэтому мощные диоды обязательно закрепляются на радиаторах. На рис. 17.5*б* и *в* показан болгарский мощный германиевый диод SFR135 и советский кремниевый диод Д246, которые имеют спе-

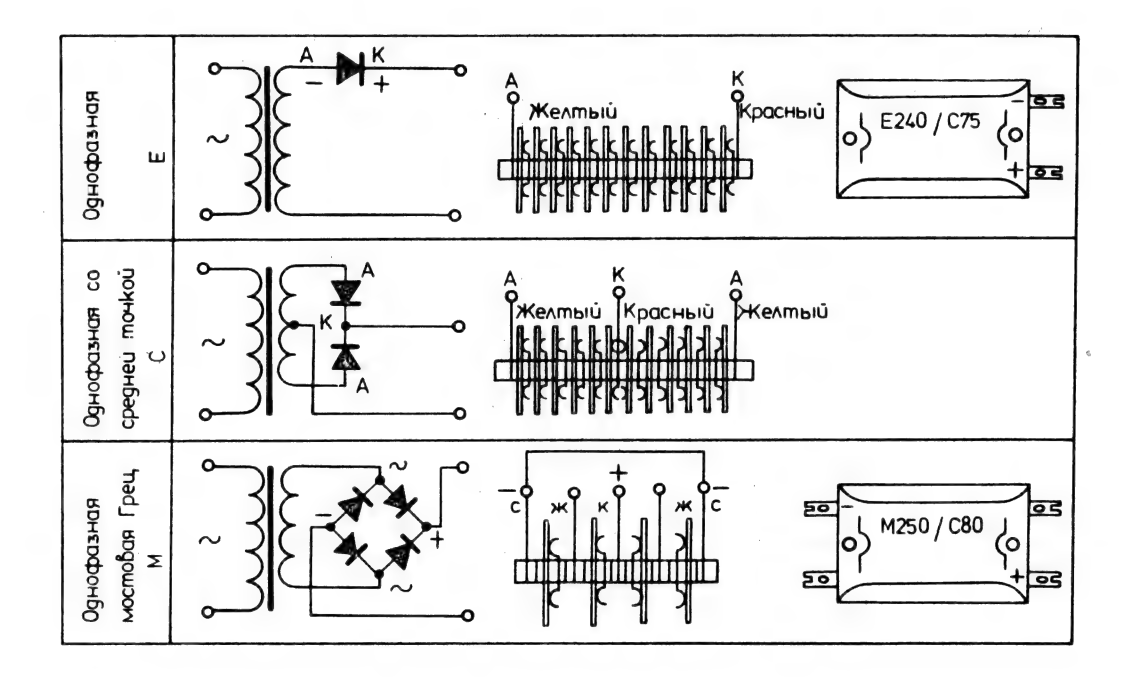


Рис. 17.8. Однополупериодная, двухполупериодная и мостовая схемы с соответствующими селеновыми столбиками и пакетами

циальные винты для крепления к радиаторам.

Основные параметры плоскостных диодов следующие:

1. Максимальный ток в прямом направлении. Это наибольший выпрямленный ток, протекающий через диод. На практике в различных диодах этот ток от 0,1 до 10 А и больше. Если указанный ток будет превышен, например, при коротком замыкании, диод выходит из строя. Надо помнить, что, когда через диод протекает максимально допустимый ток, падение напряжения на выводах диода (германиевого или кремниевого) — около 1 В.

2. Максимальное обратное напряжение. Это наибольшее напряжение в обратном направлении, при котором диод все еще сохраняет свои вентильные свойства. При его превышении наступает пробой, и диод выходит из строя.

Исправность плоскостных диодов проверяется омметром. Как показано на рис. 17.6, в прямом направлении их сопротивление должно быть небольшим (примерно 5—30 Ом), а в обратном — большим (например, более 50 кОм для германиевых и более 200 кОм для кремниевых).

17.4. Селеновые выпрямители

Это плоскостные диоды, в которых также имеется *p—n* переход. Обычно они представляют собой столбики или пакеты, содержащие *определенное число ячеек*. Каждая ячейка состоит из алюминиевой пластины, на которую нанесен слой селена, а на него специальный сплав. Во время обработки между селеном и сплавом образуется *p-n* переход (рис. 17.7*а*). Одна такая ячейка в разобранном виде показана на рис. 17.7*б*, где вывод *1* имеет контакт с алюминиевой пластиной *2* (анод), а вывод *5* посредством шайбы *4* имеет контакт со сплавом *3* (катод). В изоляционную трубку *6* входит винт, который стягивает весь столбик.

На рис. 17.7*в* показан селеновый столбик, предназначенный для выпрямителя тока по мостовой схеме, а над ним начерчены диоды и соответственно, их выводы. Видно, что в этом случае диоды соединены попарно друг против друга.

Параметры селеновой ячейки:

1. Максимальный ток в прямом направлении. Он зависит от площади ячейки. Обычно *на 1 см² допускается ток 50* мА.

Например, ячейка площадью 6×6 см = 36 см² имеет допустимый максимальный ток 1800 мА = 1,8 А.

2. Максимальное обратное напряжение. Оно не зависит от площади ячейки и чаще всего имеет величину 20 В (амплитудное значение).

В селеновых столбиках *ток через отдельные ячейки один и тот же, а обратное напряжение, которое целый столбик может выдержать, равно сумме всех напряжений на отдельных ячейках.*

Например, если данный столбик состоит из 15 ячеек и площадь каждой из них 4 см², то максимальный ток будет 200 мА, а его максимальное обратное напряжение — 15×20 = 300 В.

Селеновые ячейки, столбики и пакеты используются обычно в выпрямителях. Они имеют более простую производственную технологию, чем германиевые и кремниевые диоды. Кроме того, они *выносят перегрузки* в отличие от германиевых и кремниевых диодов, которые при коротком замыкании сразу выходят из строя. Это еще одна причина их широкого применения.

На рис 17.8 в середине показаны селеновые столбики, предназначенные для различных выпрямительных схем, данных слева. В правой части рисунка показаны и два селеновых пакета. Обозначение E240/C75 значит: однополупериодная схема выпрямления, 240 В переменное напряжение, емкостная нагрузка, максимальный ток 75 мА; M35C1800 означает: мостовая схема, 35 В переменное напряжение, емкостная нагрузка, максимальный ток 1800 мА.

17.5. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов

Как уже известно, в прямом направлении диоды пропускают электрический ток, а в обратном — не пропускают. Но в радиоэлектронике имеют дело с конкретными величинами и значениями, и поэтому возникает вопрос: каково сопротивление диода в прямом и обратном направлении?

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, надо познакомиться с понятием **вольт-амперная характеристика**. В радиоэлектронике все элементы, имеющие два вывода, называются *двухполюсниками.* Свойства любого двухполюсника видны лучше всего из его вольт-амперной характеристики. *Она выражает графическую зависимость протекающего тока от приложенного напряжения в одном и другом направлении.*

На рис. 17.9*а* показана вольт-амперная характеристика резистора. Она представляет собой прямую линию, поэтому резисторы называются еще линейными сопротивлениями. Характеристика начерчена в I и III квадрантах координатной системы, где показаны и соответствующие схемы соединения, содержащие источник тока E, потенциометр P, вольтметр и миллиамперметр. Она начерчена следующим образом. Например, если $R = 1$ кОм, при $U = 1$В, ток через резистор $I = 1$мА, и таким образом получаем точку A. Если при помощи потенциометра увеличить напряжение до 2 В, ток через резистор возрастет до 2 мА, т. е. получаем точку B. Если теперь поменяем полюса источника тока, то ток и напряжение будут иметь обратное направление, т. е. они будут отрицательными. Начертим характеристику резистора в III квадранте. Используя схему, данную в этом квадранте (см. рис. 17.9*а*), легко установить, что при напряжении $U = -1$ В ток через резистор $I = -1$ мА, т. е. получаем точку C, а при напряжении

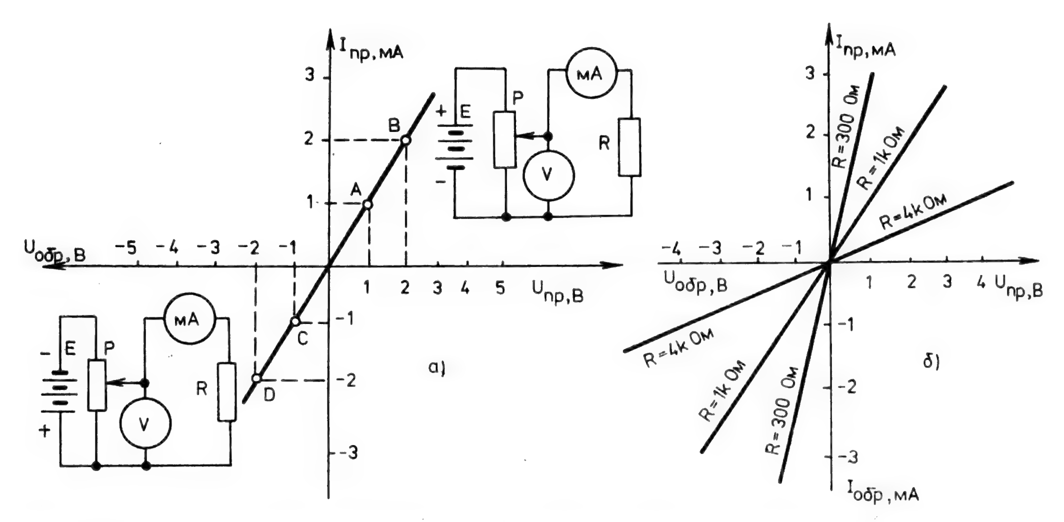


Рис. 17.9. *а*) вольт-амперная характеристика и способ, которым она снимается; *б*) вольт-амперная характеристика трех различных сопротивлений

−2 В ток $I=-2$ мА, т. е. получаем точку *Д*. Таким же образом можем построить еще много точек. Соединив все эти точки, получим вольт-амперную характеристику данного резистора. Она характерна тем, что в любой точке отношение между напряжением и током (а это по закону Ома и есть сопротивление) одно и то же. Или: сопротивление резистора не зависит от приложенного напряжения или протекающего тока.

На рис. 17.9*б* показаны вольт-амперные характеристики нескольких резисторов. Видно, что *резисторы с меньшим значением имеют более крутые вольт-амперные характеристики.*

Абсолютно таким же образом можем снять вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов. Это сделано на рис. 17.10 для двух плоскостных диодов Д7Ж и Д226Б. (Обращаем внимание на то, что масштабы напряжений и токов в прямом и обратном направлении различны.) Из рисунка видно, что вольт-амперные характеристики не прямые линии, и поэтому говорят, что *диоды — нелинейные элементы.*

Важнейшей особенностью всех нелинейных элементов является то, что их сопротивление — не определенная величина, а зависит от приложенного напряжения (или протекающего тока). Поэтому надо говорить *не о сопротивлении вообще, а о сопротивлении в определенной рабочей точке.* Для диода Д7Ж это показано на рис. 17.10, где в точке *А* его сопротивление равно 100 Ом, в точке *В* оно равно 6 Ом, а в точке *С* — 500 кОм.

17.6. Опорные диоды

Эти диоды используются не для выпрямления тока, а в качестве *стабилизаторов напряжения*. Они изготавливаются из кремния и поэтому называются *кремниевыми стабилитронами* или *опорными диодами*. В них тоже имеется *p-n* переход, однако, по сравнению с другими диодами его ширина невелика. Вот почему, когда на диод подается напряжение *в обратном направлении*, в переходе наступает *электрический пробой*, который е выводит диод из строя. Именно в режиме этого пробоя *при малейшем увеличении напряжения ток через диод резко возрастает.*

На рис. 17.11 дан внешний вид двух опорных диодов вместе с их схемным

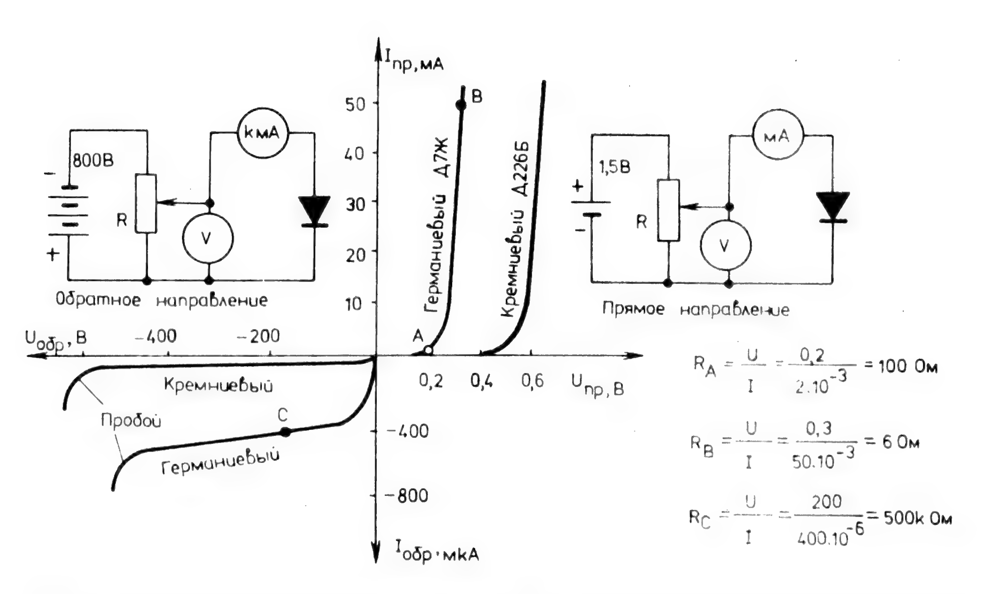


Рис. 17.10. Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов и способы, которыми они снимаются

обозначением. Диод Д808 маломощный, а диод 2С920А средней мощности и снабжен винтом для крепления к охлаждающему радиатору. На этом же рисунке показана вольт-амперная характеристика опорного диода Д808. При обратных напряжениях меньших, чем 7 В, ток через диод практически не протекает. При напряжении 7 В диод открывается (т. *1*), и через него начинает протекать ток. *При небольшом увеличении напряжения ток резко возрастает.* Например, при увеличении напряжения от 7 В до 7,3 В ток возрастает от 3 до 33 мА, т. е. в 11 раз. Именно область от т. *1* до т. *2* является *рабочим участком опорного диода.*

Основние параметры опорного диода:

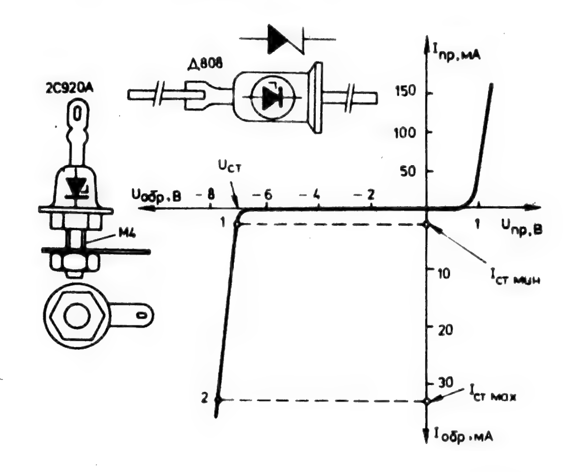
1. Напряжение стабилизации $U_{ст}$. Производятся диоды с напряжением стабилизации чаще всего от 6 до 12 В, но имеются диоды и с напряжениями от 2 до 6 В и от 12 до 300 В.

2. Минимальный ток стабилизации $I_{ст\ мин}$. Это наименьший ток, с которого начинается стабилизация.
Обычно $I_{ст\ мин} = 4 \div 5$ мА.

3. Максимальный ток стабилизации $I_{ст\ макс}$. Это наибольший ток через диод, который во время работы нельзя превышать, потому что наступает недопустимое нагревание диода. В маломощных диодах чаще всего $I_{ст\ макс} = 20 \div 40$ мА.

Чем круче участок *1—2* вольт-амперной характеристики опорного диода, тем лучше он стабилизирует напряжение.

Рис. 17.11. Кремниевый стабилитрон и его вольт-амперная характеристика



ЗАПОМНИТЕ!

1. По своим свойствам чистые полупроводники (германий, кремний, селен) близки к изоляторам. После добавления к ним соответствующих примесей из них получают *p*- и *n*-германий, *p*- и *n*-кремний и т. д., которые имеют хорошую электрическую проводимость.
2. Важнейшим свойством *p*- и *n*-полупроводников является образование *p-n* перехода при их спайке. Этот *p-n* переход имеет одностороннюю проводимость и лежит в основе действия диодов, транзисторов, тиристоров и пр.
3. Точечные диоды имеют *p-n* переход с малой площадью и одностороннюю проводимость. Они являются маломощными приборами и используются в цепях высокой частоты или с кратковременными импульсами, например, детекторные каскады, электронно-вычислительные машины и пр.
4. Плоскостные диоды обладают *p-n* переходами со значительной площадью и имеют одностороннюю проводимость. Пропускают значительные токи в прямом направлении и выдерживают большие напряжения в обратном направлении. Используются чаще всего в выпрямителях.
5. Селеновые ячейки обладают *p-n* переходом с относительно большой площадью и имеют одностороннюю проводимость. Из них делают столбики и пакеты, которые используются в выпрямителях.
6. Графическая зависимость протекающего тока от приложенного напряжения называется вольт-амперной характеристикой данного двухполюсника. Для обычных резисторов она является прямой линией, и поэтому их называют еще линейными сопротивлениями. Вольт-амперная характеристика диодов не является прямой линией, и поэтому их называют еще нелинейными элементами.

18 Биполярные транзисторы

18.1. Общие сведения

Транзисторы являются важнейшими полупроводниковыми приборами. Их основная особенность заключается в *усилении слабых электрических сигналов*, при этом, разумеется, *энергия подается от источника питания*. Поэтому они используются везде, где необходимо усиление сигналов, например, в радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах, электронной аппаратуре, автоматических устройствах и т. д.

В настоящее время существуют самые различные виды транзисторов. (В конце 1979 г. различных видов и типов транзисторов во всем мире насчитывалось около 30 000). Все транзисторы, однако, могут быть разделены на две большие группы: *биполярные и полевые*. Биполярные транзисторы имеют бóльшее распространение, и мы рассмотрим, в основном, их свойства.

18.2. Типы биполярных транзисторов

Биполярные транзисторы можно классифицировать следующим образом.

1. В зависимости от используемого полупроводника они бывают *кремниевые и германиевые*.

2. В зависимости от технологии производства они бывают *эпитаксиально-планарные, сплавные, меза-транзисторы, конверсионные и пр.*

3. В зависимости от механизма движения носителей зарядов бывают *диффузионные и дрейфовые*.

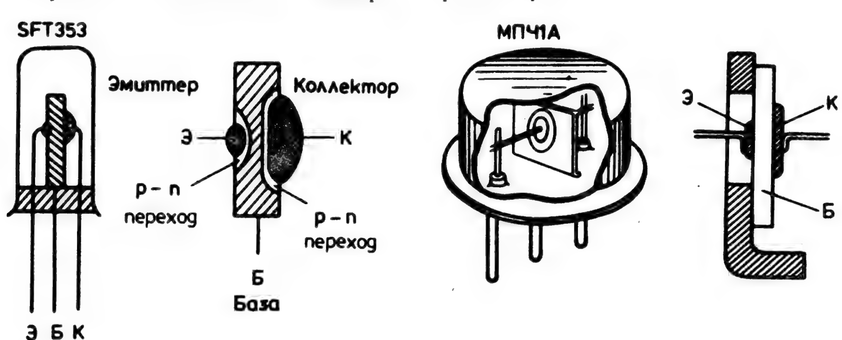
4. В зависимости от мощности бывают *маломощные* (до 0,3 Вт), *средней мощности* (от 0,3 до 3 Вт) *и мощные* (более 3 Вт).

5. В зависимости от граничной частоты бывают *низкочастотные* (до 3 МГц), *среднечастотные* (от 3 до 30 МГц), *высокочастотные* (от 30 до 300 МГц) *и сверхвысокочастотные* (выше 300 МГц).

18.3. Устройство биополярных транзисторов

Если, проявив любознательность, мы разрежем металлический корпус транзистора, вероятно, будем разочарованы его простым устройством. Как показано на рис. 18.1, основную часть транзистора представляет маленький кристаллик, называемый **базой (Б)**, на

Рис. 18.1. Устройство маломощных биполярных транзисторов



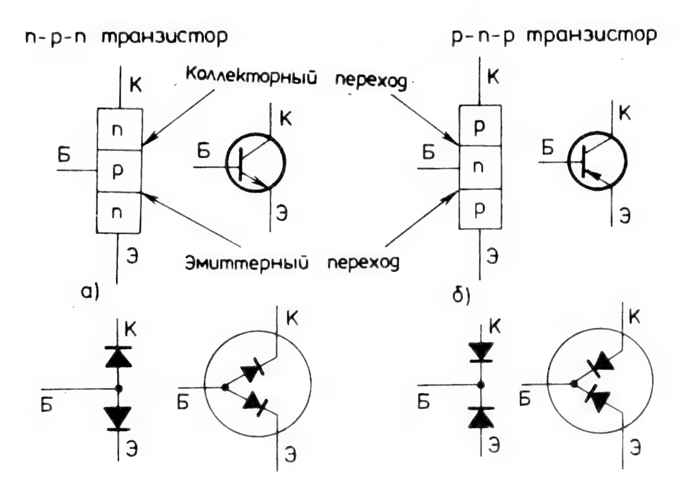


Рис. 18.2. *а*) устройство и обозначение *n-p-n* транзистора; б) устройство и обозначение *p-n-p* транзистора

котором сделаны две спайки, называемые **эмиттер (Э)** и **коллектор (К)**. При образовании этих спаек между эмиттером и базой и между коллектором и базой образуются два *p-n* перехода. Это получается, когда проводимость эмиттера и коллектора избирается противоположной проводимости базы. Очень важно запомнить, что площадь коллекторного перехода больше площади эмиттерного и, кроме этого, *оба перехода находятся очень близко друг к другу*, т. е. база очень тонкая, примерно 1—20 мкм.

В зависимости от проводимости еммиттера, базы и коллектора производятся *два типа транзисторов:n-p-n* и *p-n-p*. Это показано на рис. 18.2 вместе с их схемными обозначениями. Эти оба основных типа транзисторов имеют один и тот же принцип действия и одинаковые усилительные качества, но *отличаются полярностью цепей питания*.

Поскольку каждый *p-n* переход, в сущности, представляет собой диод, на верхнем рисунке транзистор представлен как совокупность двух диодов. И действительно, цепи база-эмиттер и база-коллектор, *взятые отдельно*, имеют одностороннюю проводимость. Однако, если мы возьмем два диода и соединим их так, как показано на рис. 18.2, то усилительного прибора не получим. Разница в том, что *в транзисторах оба перехода расположены очень близко друг к другу и между ними имеется взаимодействие*. Это взаимодействие называется еще *транзисторным эффектом*, и ему обязаны усилительными свойствами биполярные транзисторы.

Для предохранения от внешних влияний транзистор герметически закрыт в металлическом или пластмассовом корпусе. На рис. 18.3 показаны корпусы болгарских транзисторов. Корпус среднемощного транзистора SFT130—131 и T145—146 с охлаждающим ребром. В мощных транзисторах SFT212—214 и пр. коллектор не имеет вывода, а связан с корпусом. Оба отверстия предназначены для монтажа транзистора на специальном охлаждающем радиаторе.

18.4. Как усиливает биполярный транзистор

Чтобы понять, как усиливает транзистор, рассмотрим рис. 18.4*а*, где показана цепь, содержащая микрофон, батарею и громкоговоритель. Попробуем поставить микрофон и громкого-

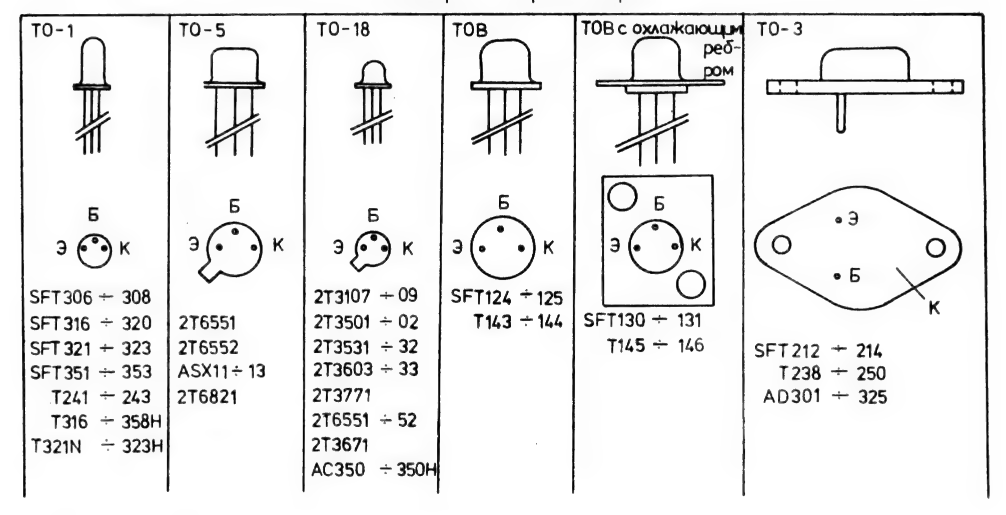


Рис. 18.3. Корпусы и расположение выводов в некоторых болгарских транзисторах

ворититель в две отдельные комнаты. Если на микрофон не подается звук, то в цепи будет протекать *только постоянный ток*, и громкоговоритель молчит (участок *А*).

Если на микрофон подается звук, то ток в цепи будет содержать на только постоянную, но и *переменную составляющую* (участок *Б*), и в громкоговорителе услышим слабый звук.

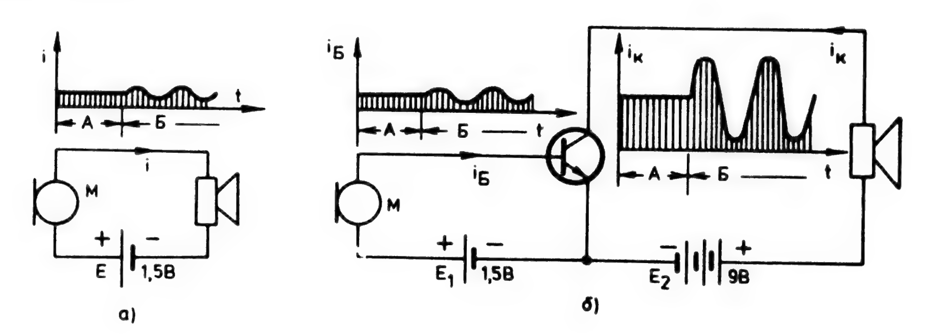
Используя транзистор, мы можем усилить этот звук. Это показано на рис. 18.4*б*, где использованы две батареи питания. Если проделаем соответствующие измерения, то увидим, что *ток и напряжение на выходе транзистора значительно больше тока и напряжения на входе.*

Важнейшей особенностью каждого усилительного элемента является *значительное увеличение мощности на выходе (на нагрузке) по сравнению с мощностью, поданной на вход.* И поскольку мощность — это произведение тока на напряжение (см. гл. 4), возможны следующие варианты усилителей:

1. Схема усиливает по напряжению и по току. В транзисторных усилителях этот случай наиболее желателен.

2. Схема усиливает только по на-

Рис. 18.4. *а*) электроакустическая цепь без усилительного прибора; *б*) электроакустическая цепь с усилительным прибором



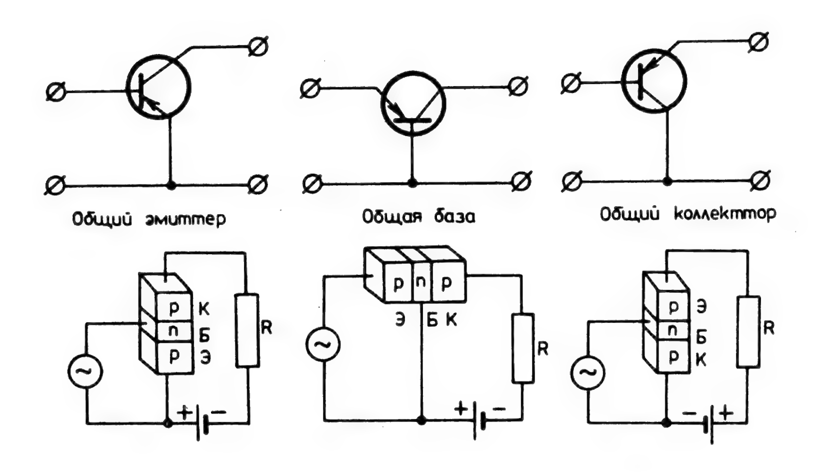


Рис. 18.5. Три основные схемы соединения биполярного транзистора: с общим эмиттером (ОЭ); с общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК)

пряжению, а ток на выходе и входе почти один и тот же.

3. Схема усиливает только по току, а напряжение на выходе и входе почти одно и то же.

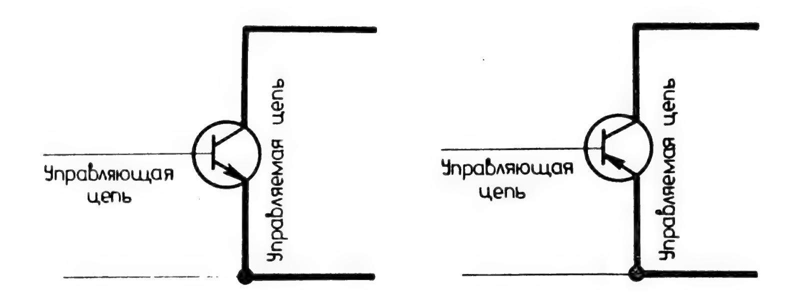
Биполярный транзистор проявляет усилительные свойства в трех видах схем, которые отличаются способом включения транзистора: *с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК)*. В связи с этим молодые радиолюбители часто задают вопрос: зачем надо использовать все три схемы включения транзистора? Не лучше ли выучить только ту схему, которая имеет наибольшее усиление, а остальные отбросить?

Качества любого усилителя зависят не только от того, во сколько раз он усиливает, но и от его входного и выходного сопротивления. В некоторых случаях эти сопротивления даже важнее коэффициента усиления. Поэтому на практике используют все три основные схемы соединения (с ОЭ, ОБ, ОК), т. к. каждая из них имеет свои преимущества и недостатки.

В схеме с ОЭ входной сигнал действует между базой и эмиттером, а нагрузка включена между коллектором и эмиттером (рис. 18.5). *Эта схема усиливает и по напряжению и по току и на практике используется наиболее часто.* Ее входное и выходное сопротивления не очень велики.

В схеме с ОБ входной сигнал действует между эмиттером и базой, а нагрузка включена между коллектором и базой (рис. 18.5). *Эта схема усиливает только по напряжению* и имеет малое

Рис. 18.6. Управляющая цепь в транзисторе — между базой и эмиттером, а управляемая — между коллектором и эмиттером



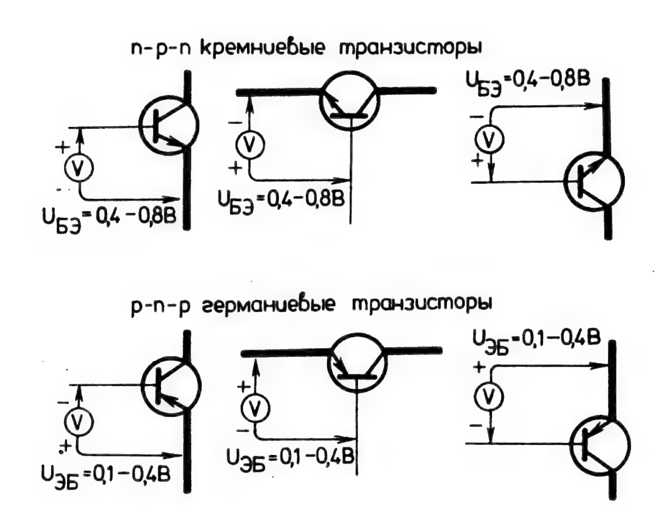


Рис. 18.7. Напряжение в управляющей цепи, в принципе, мало

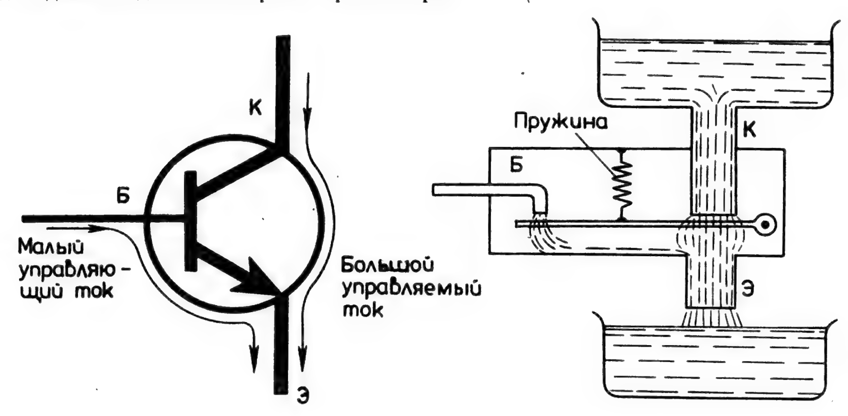
входное сопротивление и большое выходное.

В схеме с ОК (ее называют еще эмиттерный повторитель) входной сигнал поступает на управляющий переход эмиттер-база, *проходя через нагрузку*, а сама нагрузка включается между эмиттером и коллектором (рис. 18.5). *Это схема усиления по току*. Ее входное сопротивление велико, а выходное мало.

Следует обратить внимание на одно важное обстоятельство: **независимо от схемы включения (с ОЭ, ОБ, ОК) управляющий переход в транзисторе — эмиттерный, а управляемая цепь, сопротивление которой изменяется, — эмиттер-коллектор** (на рис. 18.6 эта цепь начерчена толстой линией). При этом *полярность источников питания такова, что эмиттерный переход включен всегда в прямом направлении, а коллекторный — в обратном*. Поэтому во всех схемах (с ОЭ, ОБ, ОК) *напряжения, которые действуют на управляющем участке, малы* — например $0{,}1 \div 0{,}4$ В в германиевых и $0{,}4 \div 0{,}8$ В в кремниевых транзисторах (рис. 18.7), в то время как *напряжения коллектор-эмиттер могут быть довольно значительными* — порядка $6 \div 24$ В.

Другая важная особенность транзисторов — базовый ток намного меньше эмиттерного и коллекторного

Рис. 18.8. Водяная модель биполярного транзистора



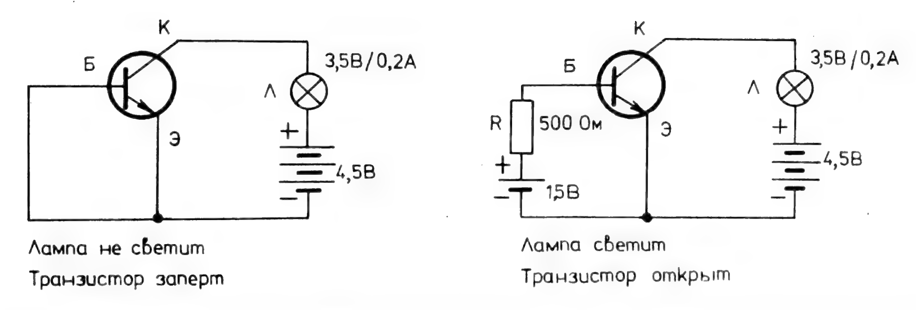


Рис. 18.9. При соединении базы эмиттером транзистора ток в коллекторной цепи практически не протекает. При протекании небольшого тока между базой и эмиттером транзистор открывается, и ток в коллекторной цепи может быть значительным

токов (последние два практически одинаковы). Таким образом, *основное свойство транзистора* можно сформулировать так: **малый базовый ток управляет намного бóльшим коллекторным током**. Эта особенность показана на рис. 18.8, где видна аналогия между транзистором и водно-механическим устройством. И действительно, тонкая струя воды в трубе *Б* управляет толстой струей воды посредством труб *К* и *Э*. При этом струя *Э* равна сумме струй *Б* и *К*.

В импульсной технике транзистор чаще всего используется в качестве ключа. В этом случае он *или заперт* (сопротивление коллектор-эмиттер большое) *или открыт* (сопротивление коллектор-эмиттер мало). Это запирание и открывание достигается путем соответствующего запирания или пропускания базового тока. Подобный же опыт, который можно легко проделать, показан на рис. 18.9. В первом случае базовый и коллекторный ток равны нулю, а во втором случае $I = 2 \div 3$ мА, а $I_К = 200$ мА. Следовательно, и здесь посредством небольшого базового тока можно управлять довольно большим током в цепи коллектора.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Транзисторы могут усиливать слабые электрические сигналы, разумеется, используя энергию устройства питания.**
2. **В каждом биполярном транзисторе имеется три полупроводниковые области, разделенные двумя *р- n* переходами. В зависимости от проводимости этих областей различают *р-n-р* и *n-р-n* транзисторы. Они имеют один и тот же принцип действия, но отличаются полярностью питания.**
3. **Устройство обладает усилительными свойствами, если мощность, полученная на выходе, больше мощности, поданной на вход. Биполярный транзистор обладает свойствами усилителя в трех схемах соединения: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК).**
4. **На практике наиболее часто используется схема с ОЭ. В ней небольшой базовый ток управляет намного бóльшим коллекторным током.**
5. **В импульсной технике транзистор используется чаще всего в роли ключа. В этом случае коллекторная цепь находится поочередно в двух состояниях: или запертом или открытом.**

19 Особенности биполярных транзисторов

19.1. Обратный коллекторный ток

Когда коллекторный переход соединен в обратном направлении, а эмиттер свободен (рис. 19.1*а, б*), в цепи протекает так называемый *обратный коллекторный ток* $I_{КБО}$. Индекс КБО расшифровывается так: ток между коллектором и базой при открытом эмиттере. Этот ток очень мал, но является *важным параметром* биполярных транзисторов и приводится в справочниках. В маломощных германиевых транзисторах он равен $1 \div 30$ мкА, в кремниевых — менее 1 мкА, а в мощных германиевых транзисторах достигает $50 \div 100$ мкА.

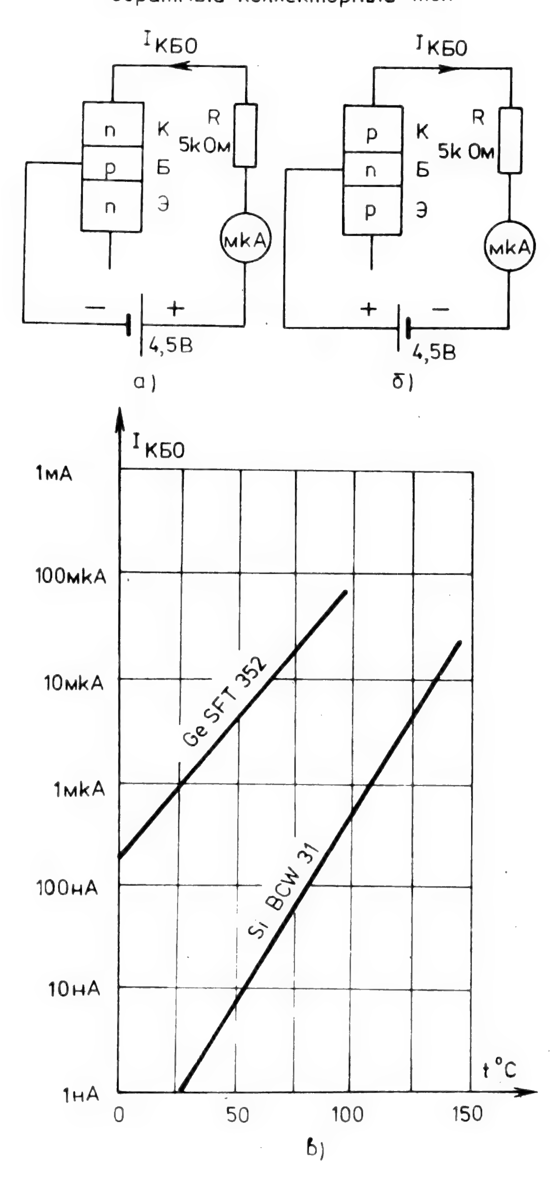
Обратный коллекторный ток очень мал, однако на него надо обращать внимание, потому что с *повышением температуры перехода* (во время работы любой транзистор нагревается) обратный коллекторный ток *сильно возрастает* — на каждые 10 С *удваивает свое значение* (рис. 19.1*в*).

Например, если при $t = 20$ С данный транзистор имеет ток $I_{КБО} = 10$ мка, то из таблицы 19.1 видно, что при $T = 70°$ С этот ток возрастает на 320 мкА. Но большая „беда" вызвана не столько его возросшим значением, сколько тем фактом, что в различных усилительных схемах одна часть этого тока *проходит через управляющий эмиттерный переход* транзистора и это приводит к сильному увеличению коллекторного тока.

Таблица 19.1

t, °C	20	30	40	50	60	70
$I_{КБО}$, мкА	10	20	40	80	160	320

Рис. 19.1. *а*) схема измерения обратного коллекторного тока *n-p-n* транзистора; *б*) схема измерения обратного тока *n-p-n* транзистора; *в*) обратный ток германиевых транзисторов значительно больше, чем кремниевых



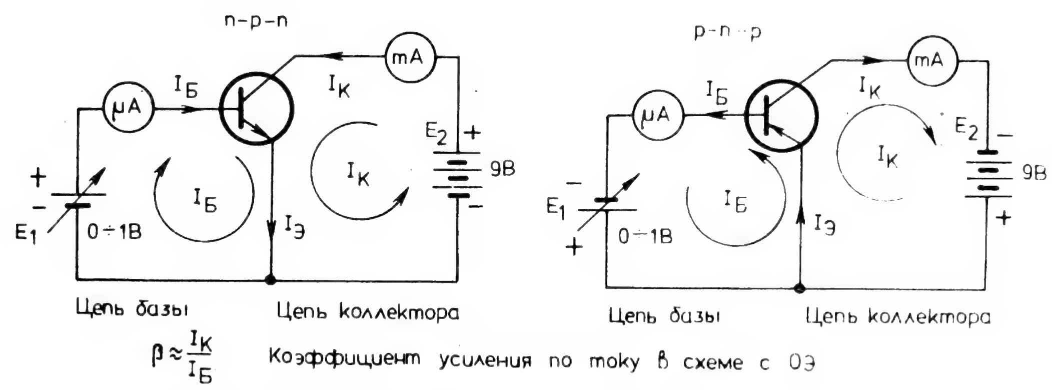


Рис. 19.2. Определение коэффициента усиления по току β в схеме ОЭ

19.2. Температурная нестабильность

Если говорить о недостатках транзисторной аппаратуры, то прежде всего надо вспомнить о температурной нестабильности транзисторов. Как мы уже видели, основным „виновником" этого является обратный коллекторный ток.

Температурная нестабильность — явление нежелательное, т. к. *температура изменяет ряд основных параметров усилительных каскадов*, как коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление, частота автогенерации и т. д. И поскольку каждый транзистор имеет строго определенный обратный коллекторный ток (он зависит только от конструкции транзистора), то хорошая стабильность достигается следующим образом.

1. Использованием транзисторов с наименьшим током $I_{КБО}$. В этом отношении кремниевые транзисторы лучше германиевых и это одна из причин их широкого распространения в последнее время.

2. Использованием таких схем, в которых бóльшая часть тока $I_{КБО}$ отклоняется во внешние цепи, а через управляющий переход протекает возможно меньшая часть.

3. Использованием дополнительных средств (отрицательной обратной связи, сбалансированных схем и пр.), которые улучшают температурную стабильность.

19.3. Коэффициент усиления β

Как мы уже видели, схема с ОЭ — хороший усилитель тока. В этом можно убедиться с помощью схемы, показанной на рис. 19.2. Здесь через источник тока E_1 (например, регулируемый выпрямитель) можно подавать различный базовый ток и учитывать соответствующий коллекторный ток. Опыты с различными транзисторами показывают, что коллекторный ток всегда во много раз больше базового.

Число, показывающее во сколько раз коллекторный ток больше базового, обозначается буквой β (или $h_{21Э}$) *и называется* **коэффициентом усиления по току в схеме с ОЭ**. Следовательно, можем записать

$$\beta \approx \frac{I_К}{I_Б}.$$

Это равенство приблизительное, поскольку не учтены относительно малые неуправляемые токи. Коэффициент β является *основным параметром транзисторов и приводится в справочниках*. Различные виды транзисторов имеют обычно коэффициент $\beta = 30 \div 300$, но есть и такие, β которых достигает 1000.

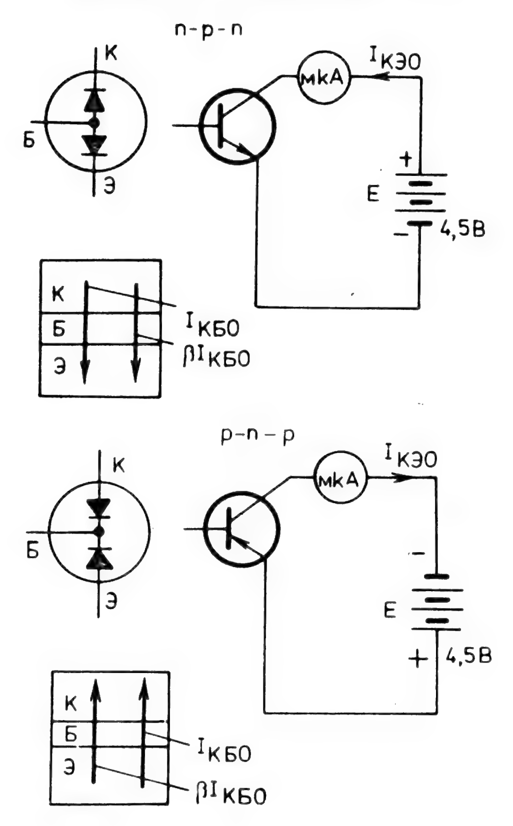
На основе вышесказанного, основ-

ное свойство биполярного транзистора можно сформулировать так: **любой ток, протекающий через управляющий эмиттерный переход, вызывает в β** раз больший коллекторный ток.

19.4. Неуправляемые токи в транзисторе

На рис. 19.3 показана схема, в которой база ни с чем не связана (режим плавающей базы). В этом случае в цепи протекает т. н. *остаточный ток* $I_{КЭО}$ (здесь индекс КЭО обозначает ток коллектор-эмиттер при открытой базе). Если исходить из представления о транзисторе как о двух соединенных навстречу друг другу диодов, то надо

Рис. 19.3. Схемы измерения остаточного коллекторного тока биполярных транзисторов



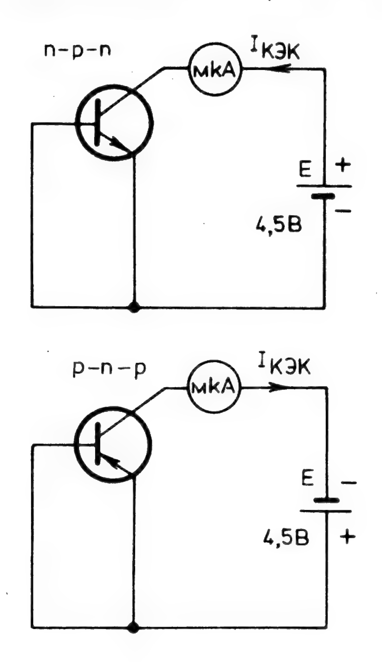
ожидать, что в этом случае один из диодов будет пропускать ток, а другой его запирать (рис. 19.3). В результате этого ток в цепи должен быть равным обратному току $I_{КБО}$. Однако, опыты показывают, что ток, который протекает, намного больше, а в мощных германиевых транзисторах с большим коэффициентом β он наибольший.

Причиной этого является *усилительное свойство транзистора, обусловленное взаимодействием двух близко расположенных переходов*. При этом обратный ток $I_{КБО}$ протекает через управляющий переход и согласно усилительному свойству транзистора вызывает в β раз бóльший коллекторный ток, т. е. к току $I_{КБО}$ прибавляется ток $\beta I_{КБО}$ (рис. 19.3). Таким образом, коллекторный ток в режиме плавающей базы будет

$$I_{КЭО} = I_{КБО} + \beta I_{КБО} = (\beta + 1) I_{КБО}. \qquad (19.2)$$

Из этой формулы следует, что ток $I_{КЭО}$ будет значительным в тех тран-

Рис. 19.4. Схемы измерения начального коллекторного тока биполярных транзисторов



зисторах, которые имеют большой коэффициент β и большой ток $I_{КБО}$. Например, кремниевый маломощный транзистор 2Т6551 имеет $I_{КБО}=0,05$ мкА и В=120, поэтому ток в режиме плавающей базы равен $I_{КЭО}=6$ мкА. Однако мощный германиевый транзистор AD304 имеет $I_{КБО}=100$ мкА и $\beta=100$, в результате чего ток в режиме плавающей базы $I_{КЭО}=10$ мА. Если такой транзистор оставить под напряжением в режиме плавающей базы (особенно, если коллекторное напряжение значительно, например, в оконечных каскадах), начнется нагревание коллекторного перехода, что вызовет увеличение тока $I_{КБО}$. От этого соответственно увеличится $I_{КЭО}$ и еще больше нагреется переход и т. д., так что этот *самовозрастающий ток* может перегреть транзистор и повредить его. Поэтому *режим плавающей базы, особенно в схеме с германиевыми транзисторами, не рекомендуется использовать на практике.*

Другой неуправляемый ток в транзисторе получается, когда эмиттер и база соединены накоротко (рис. 19.4). Этот ток обозначается $I_{КЭК}$ и называется *начальным коллекторным током.* Здесь индекс КЭК обозначает ток между коллектором и эмиттером при коротком замыкании базы и эмиттера. По величине этот ток относительно мал и находится по формуле

$$I_{КЭК}=(2\div 5)I_{КБО}. \qquad (19.3)$$

Опыты показывают, что у маломощных германиевых транзисторов $I_{КЭК}=1\div 50$ мкА, а у кремниевых — меньше 1 мкА. На основании этого можно сказать, что при соединении, показанном на рис. 19.4, цепь коллектор-эмиттер транзистора заперта.

19.5. Коэффициент усиления α

Свойства схемы с ОБ можно исследовать, собрав схему, показанную на рис. 19.5. *Число, показывающее во сколько раз коллекторный ток больше эммиттерного, обозначается буквой* α (или $h_{21Б}$) *и называется* **коэффициентом усиления по току в схеме с ОБ**. Следовательно, можно записать

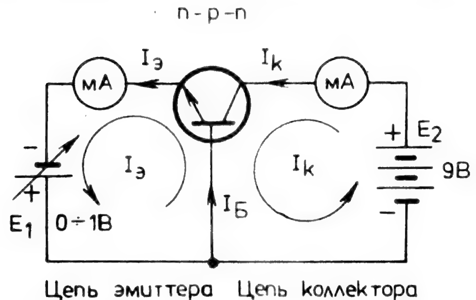
$$\alpha\approx\frac{I_К}{I_Э}. \qquad (19.4)$$

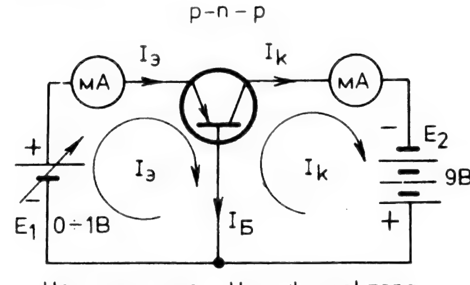
Это равенство тоже приблизительное, т. к. не учтен относительно малый ток $I_{КБО}$. Опыты с различными транзисторами показывают, что *коллекторный ток всегда меньше эмиттерного и поэтому коэффициент* α всегда меньше единицы. Этот коэффициент является параметром транзисторов и иногда приводится в стравочниках. Обычно $\alpha=0,950\div 0,998$.

На основании вышесказанного может возникнуть вопрос, есть ли польза от такой схемы, если ток на выходе меньше тока на входе?

Действительно, здесь ток, вместо того чтобы увеличиваться, уменьшает-

Рис. 19.5. Определение коэффициента передачи по току α в схеме с ОБ





$\alpha\approx\frac{I_k}{I_э}$ Коэффициент усиления по току в схеме с ОБ

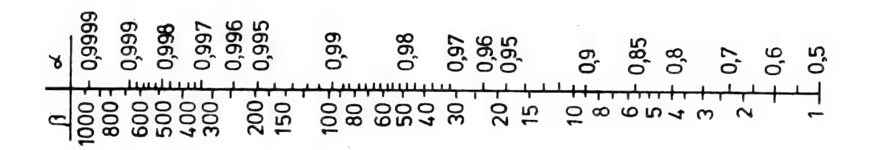


Рис. 19.6. Номограмма, определяющая связь между коэффициентами β и α

ся, однако *схема с ОБ — хороший усилитель по напряжению.* Кроме того, она имеет очень хорошие частотные свойства и хорошую температурную стабильность. Поэтому она часто используется для усиления высоких частот.

Коэффициенты α и β любого транзистора связаны между собой. Если мы знаем один из них, можем легко найти другой, при помощи номограммы, данной на рис. 19.6.

19.6. Полярность напряжений питания

Поскольку имеется два основных типа транзисторов (*n-p-n* и *p-n-p*), в схемах с ОЭ и ОБ надо запомнить полярность восьми источников питания (см. рис. 19.2 и 19.5). Это сделать легко, если обратить внимание на само обозначение транзистора. Действительно, *эмиттерная стрелка* в круге обозначает, что в *n-p-n* транзисторах эмиттерный ток (имеются в виду постоянные составляющие) „выходящий", а остальные два „входящие"; в *p-n-p* транзисторах эмиттерный ток „входящий", а остальные два „выходящие". Направлениям этих токов соответствует и полярность напряжения питания. В связи с этим, применив к транзистору первый закон Кирхгофа, получим

$$I_Э = I_Б + I_К. \qquad (19.5)$$

Эта формула действительна *для всех трех схем включения* (ОЭ, ОБ и ЭК). При этом надо помнить, что эмиттерный и коллекторный ток имеют почти одинаковую величину, в то время как базовый во много раз (β раз) меньше.

19.7. Основные параметры биполярного транзистора

Наиболее важные параметры, которые характеризуют свойства транзисторов и указываются в справочниках, следующие.

1. *Вид материала* (Ge или Si).

2. *Вид проводимости (p-n-p* или *n-p-n*).

3. *Статический коэффициент усиления по току β в схеме с ОЭ* (см. выше).

4. *Статический коэффициент усиления по току α в схеме с ОБ* (см. выше).

5. *Обратный коллекторный ток* $I_{КБО}$ (см. выше).

6. *Максимально допустимое коллекторное напряжение* $U_{КБ\ макс}$. Это наибольшее напряжение между коллектором и базой в обратном направлении, которое может выдержать коллекторный переход продолжительное время при открытом эмиттере без наступления пробоя.

7. *Максимально допустимое коллекторное напряжение* $U_{КЭ\ макс}$. Это наибольшее напряжение между коллектором и эмиттером, которое может выдержать транзистор при условии, что база связана через определенное сопротивление с эмиттером. Для данного транзистора напряжение $U_{КЭ\ макс}$ всегда меньше или равно напряжению $U_{КБ\ макс}$.

8. *Максимальная мощность, рассеи-*

ваемая на коллекторе $P_{К\ макс}$. Это наибольшая мощность, которую транзистор может рассеять в окружающее пространство в виде тепла при максимально допустимом нагреве (70° С для германиевых и 150° С для кремниевых). Для мощных транзисторов это действительно при использовании соответствующего радиатора. Обратите внимание, что подаваемая на транзистор электрическая мощность $P = U_К I_К$ ни в коем случае не должна превышать максимальную мощность $P_{К\ макс}$, которую он может рассеивать.

9. *Максимально допустимый коллекторный ток* $I_{К\ макс}$. Это наибольший коллекторный ток, который нельзя превышать ни при каких условиях эксплуатации.

10. *Граничная частота коэффициента усиления по току* f_α. Это частота, на которой коэффициент α уменьшается на 30% (на 3 дБ) относительно своего значения на низких частотах.

11. *Граничная частота коэффициента усиления по току* f_β. Это частота, на которой коэффициент α уменьшается на 30% (на 3 дБ) относительно своего значения на низких частотах. Для данного транзистора частота f_β почти в β раз ниже частоты f_α.

12. *Переходная (транзитная) частота усиления тока базы* $f_т$. Это частота, на которой коэффициент усиления по току β становится равным единице.

13. *Коэффициент шума* $F_ш$. Он характеризует собственный шум транзистора. Измеряется в децибелах. Маломощные транзисторы обычно имеют коэффициент шума $F_ш$ меньше 10 дБ.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Обратный ток коллекторного перехода очень мал, однако очень сильно увеличивается при нагревании транзистора. Кроме того, в различных схемах одна его часть проходит через управляющий эмиттерный переход и вызывает температурную нестабильность, которая в свою очередь приводит к изменению параметров схемы.**
2. **Обратный коллекторный ток кремниевых транзисторов намного меньше, чем германиевых. В результате этого устройства, собранные на кремниевых транзисторах, имеют очень хорошую температурную стабильность.**
3. **Статический коэффициент усиления β — основной параметр биполярных транзисторов и указывается в справочниках. Он показывает, во сколько раз коллекторный ток больше базового. В современных транзисторах обычно $\beta = 30 \div 300$. Чем больше этот коэффициент, тем лучше усилительные свойства транзистора.**
4. **Когда транзистор находится под напряжением, а его база не соединена ни с каким элементом (т. н. плавающая база), ток в цепи почти в β раз больше обратного коллекторного тока. В данном случае важно то, что здесь налицо условия для „самонагревания" транзистора, что может привести к выходу из строя транзистора (особенно мощных германиевых).**
5. **Когда транзистор находится под напряжением, а его база соединена с эмиттером, ток в цепи очень мал и равен приблизительно обратному коллекторному току. Поэтому можно принять, что цепь коллектор-эмиттер заперта.**



Графические характеристики биполярного транзистора

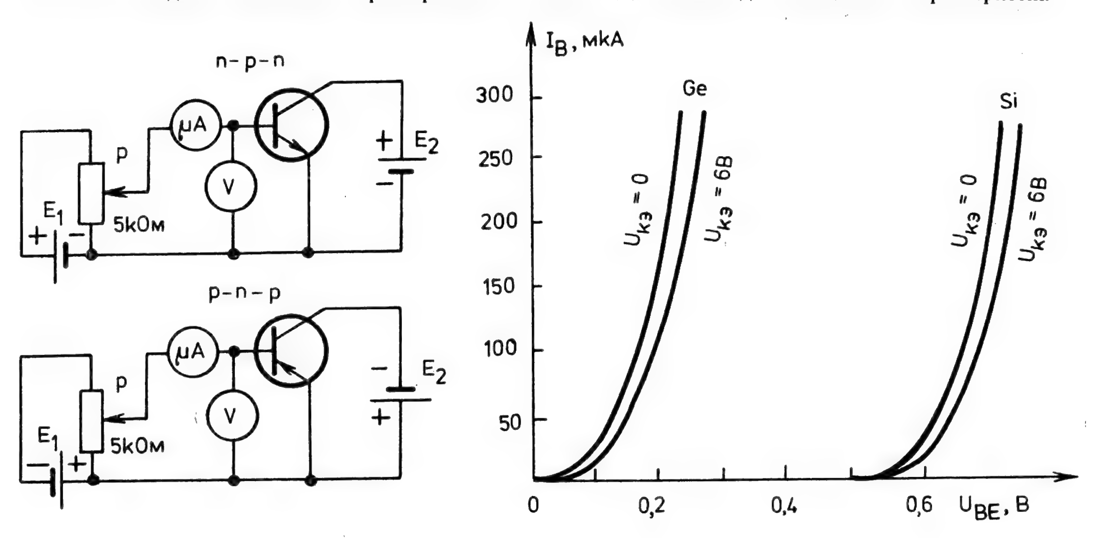
20.1. Входные статические характеристики в схеме с ОЭ

В схеме с ОЭ входные характеристики выражают *зависимость базового тока $I_Б$ от приложенного между базой и эмиттером напряжения $U_{БЭ}$* (при определенном напряжении $U_{КЭ}$). Обратите внимание, что порядок индексов совпадает с положительным направлением тока, поэтому $U_{ЭБ} = -U_{БЭ}$ и $U_{ЭК} = -U_{КЭ}$. Для снятия входных характеристик можно использовать схему, данную на рис. 20.1, где при помощи потенциометра *P* подаются различные входные напряжения и измеряются протекающие входные токи. На этом же рисунке показано, как выглядят входные характеристики германиевого и кремниевого транзисторов. Видно, что они похожи на характеристики диодов, т. е. *входные характеристики транзисторов нелинейны*. При увеличении коллекторного напряжения они очень мало смещаются вправо, но на практике это смещение не учитывается. Из рисунка видно еще, что в схеме с ОЭ напряжение база-эмиттер в германиевых транзисторах не превышает 0,4 В, а в кремниевых — не превышает 0,8 В. *При превышении этих входных напряжений токи, проходящие через транзистор, могут стать недопустимо большими и могут привести к неисправности.*

20.2. Для чего используются входные статические характеристики

Поскольку входная характеристика транзистора нелинейна, *его входное сопротивление не является точно опре-*

Рис. 20.1. Входные статические характеристики в схеме с ОЭ и схемы для снятия этих характеристик



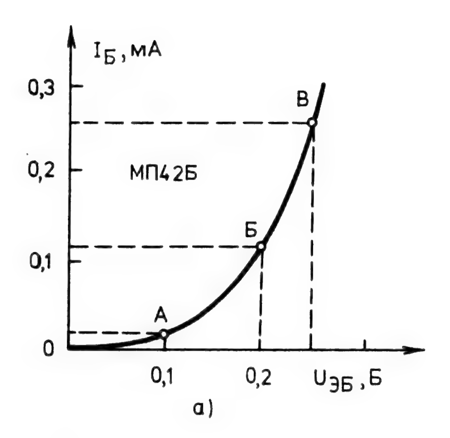
делением, а зависит от приложенного напряжения и протекающего тока. Это значит, что зависимость входного тока от входного напряжения выражается сложной формулой, неудобной на практике. Именно поэтому, когда надо найти входной ток, протекающий при данном входном напряжении, используют входную характеристику транзистора. Например, на рис. 20.2*а* можем определить, что если в транзисторе МП42Б (он имеет $\beta = 50$) напряжение эмиттер-база равно 0,1 В (точка *А*), его базовый ток 20 мкА, а коллекторный ток $I_к \approx \beta I_Б = 50 \cdot 20 = 1000$ мкА = 1мА; при $U_{ЭБ} = 0{,}2$ В (точка Б) определяем базовый ток $I_Б = 120$ мкА, коллекторный ток будет равен $I_К \approx \beta I_Б = 50 \cdot 120 = 6000$ мкА = 6 мА и т. д. Ту же характеристику можно использовать и в обратном порядке: для того, чтобы коллекторный ток данного транзистора был равен $I_К = 13$ мА, базовый ток должен быть

$$I_Б \approx \frac{I_К}{\beta} = \frac{13}{50} = 0{,}26 \text{ mA},$$

а по характеристике определяем, что напряжение эмиттер-база должно быть $U_{ЭБ} = 0{,}25$ В (точка *В*).

По входной характеристике можно найти *входное сопротивление транзистора для постоянного и переменного тока*. Обратите внимание, что в любой точке вольт-амперной характеристики одному нелинейному элементу соответствует два сопротивления: по постоянному току и по переменному току (дифференциальное, динамическое), которые в общем случае друг с другом не совпадают. Сопротивление по постоянному току относится к постоянной составляющей сигнала, а по переменному току — к переменной составляющей сигнала. Входное сопротивление по переменному току особенно важно, потому что с его помощью производится согласование отдельных транзисторных ступеней.

Для нахождения *сопротивления по постоянному току* в данной точке используется закон Ома.



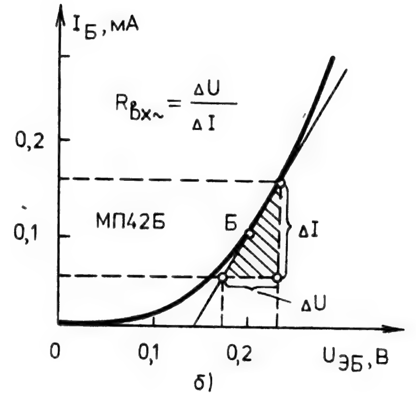


Рис. 20.2. *а*) входная статическая характеристика в схеме с ОЭ; *б*) определение входного сопротивления транзистора по переменному току в точке *Б*

$$R_{вх} = \frac{U}{I}.$$

Например, входное сопротивление по постоянному току транзистора МП42Б в точке *А* (рис. 20.2*а*) равно

$$R_А = \frac{U_А}{I_А} = \frac{0{,}1}{20 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ кОм}.$$

Таким же образом находим, что в точке *Б* оно равно 1600 Ом, а в точке *В* — 1 кОм.

Для нахождения *сопротивления по переменному току* в данной точке используется т. н. закон Ома в дифференциальной форме

$$R_{вх} = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

где ΔU и ΔI обозначают малые приращения напряжения и тока около данной точки. Например, найдем сопротивление по переменному току того же самого транзистора в той же точке *Б* (рис. 20.2*б*). Для этого задаем следующие малые приращения (заштрихованный треугольник):

$\Delta U = 0{,}225 - 0{,}175 = 0{,}05$ В,

$\Delta I = 160 - 60 = 100$ мкА.

Тогда сопротивление по переменному току в точке *Б* будет

$$R_Б = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0{,}05}{100 \cdot 10^{-6}} = 500 \text{ Ом}.$$

Напомним, что сопротивление по постоянному току этого же транзистора в той же точке было 1600 Ом.

Путем подобных вычислений можно найти, что сопротивление по переменному току этого же транзистора в точке *А* равно 4 кОм, а в точке *В* 400 Ом.

В заключение можно сказать, что *входное сопротивление транзистора по переменному току зависит от выбранной рабочей* ***точки***, *т. е. при большем токе базы (или коллектора) оно меньше*. Практика показывает, что в схеме с ОЭ сопротивление обычно от 500 Ом до 5 кОм.

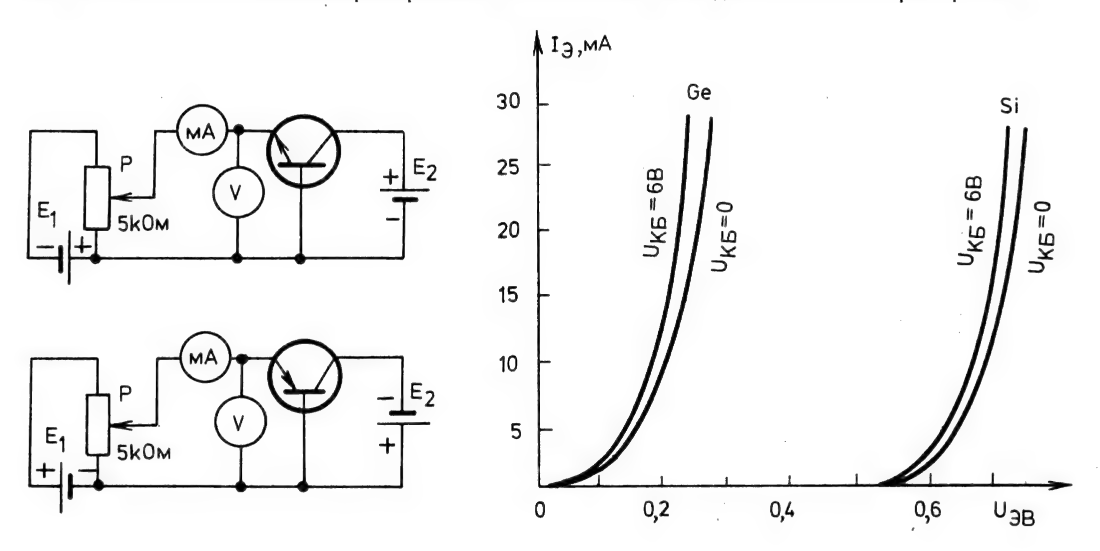
20.3. Входные статические характеристики в схеме с общей базой

В этом случае входные характеристики выражают *зависимость эмиттерного тока $I_Э$ от приложенного между эмиттером и базой напряжения* (при определенном напряжении $U_{КБ}$).

Для снятия таких характеристик можно использовать схему, показанную на рис. 20.3. На этом же рисунке показаны входные характеристики германиевого и кремниевого транзисторов. Видно, что они похожи на входные характеристики в схеме с ОЭ, но имеют два существенных различия. Во-первых, здесь при увеличении коллекторного напряжения характеристики смещаются влево. Это смещение мало, и им практически пренебрегают. Во-вторых, эмиттерный ток намного больше базового, поэтому масштаб тока по оси ординат другой.

Входные характеристики в схеме с ОБ используются для определения тех же величин, что и в схеме с ОЭ (связь между $I_Э$ и $U_{ЭБ}$, $R_{вх}$, $R_{вх\sim}$). Следует, однако, подчеркнуть, что при одних и тех же напряжениях (например, $0{,}1 \div 0{,}4$ В в германиевых и $0{,}4 \div 0{,}8$ В в кремниевых транзисторах) *входное сопротивление схемы с ОБ значительно*

Рис. 20.3. Входные статические характеристики в схеме с ОБ и схемы для снятия этих характеристик



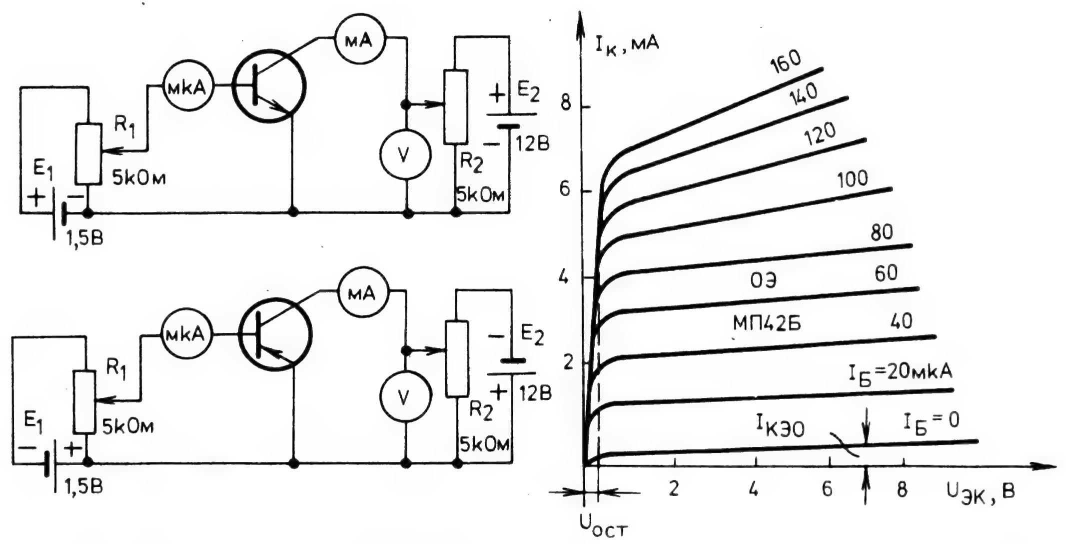


Рис. 20.4. Выходные статические характеристики в схеме с ОЭ и схемы для снятия этих характеристик

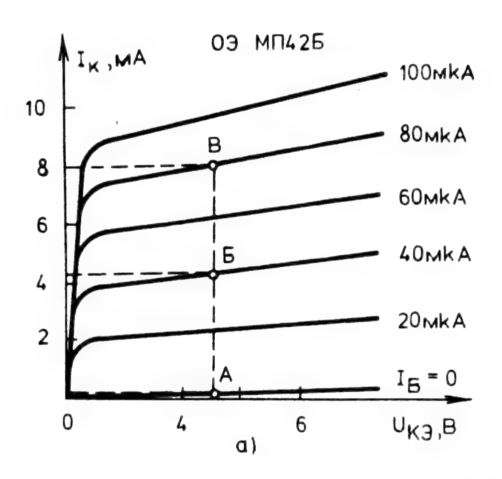
меньше, чем в схеме с ОЭ, при этом оно, разумеется, зависит от выбранной рабочей точки. Практика показывает, что в схеме с ОБ входное сопротивление по переменному току чаще всего имеет значения от 10 до 100 Ом.

20.4. Выходные статические характеристики биполярного транзистора в схеме с ОЭ

В этом случае выходные характеристики выражают *зависимость коллекторного тока $I_К$ от выходного напряжения $U_{ЭК}$* (при определенном базовом токе $I_Б$). Для снятия этих характеристик можно использовать схему, показанную на рис. 20.4. На этом же рисунке показано семейство выходных характеристик транзистора МП42Б, где каждая из них соответствует определенному току базы. Выходные характеристики транзистора тоже нелинейны. Особенность их состоит в том, что при малых напряжениях (не более 0,4 ÷ 0,8 В) коллекторный ток растет быстро, после чего он практически не зависит от коллекторного напряжения (характеристики почти горизонтальные), а зависит только от базового тока. Другими словами, если пожелаем увеличить коллекторный ток данного транзистора, то добиться этого можно *не увеличением коллекторного напряжения, а единственно увеличением базового тока.* В этой особенности надо хорошо разобраться, т. к. она подтверждает, что коллекторный ток действительно „управляется" не с выхода, а со входа.

20.5. Для чего используются выходные статические характеристики

Выходные характеристики дают *количественную связь между тремя основными величинами транзистора:* током базы, током коллектора и коллекторным напряжением. Выходное сопротивление транзистора тоже нелинейно, т. е. зависимость выходного тока от выходного напряжения выражается довольно сложной формулой. Поэтому для нахождения этой величины и здесь используем выходные характеристики транзистора. Например, по рис. 20.5*а* можно определить, что при коллекторном напряжении 4,5 В и базовом токе 40 мкА (точка *Б*) коллекторный ток



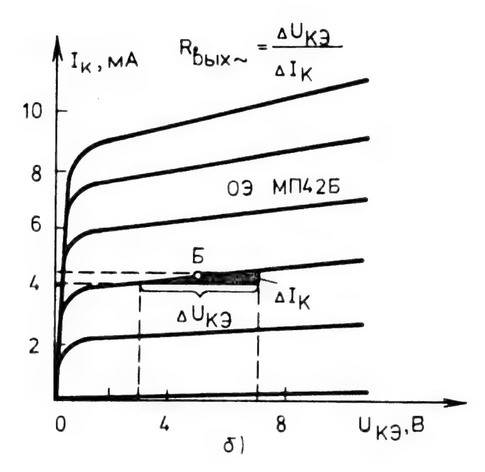


Рис. 20.5. *а*) в точках *А*, *Б* и *В* коллекторное напряжение неизменно 4,5 В, а коллекторный ток различен; *б*) определение выходного сопротивления транзистора по переменному току в точке *Б*

будет 4,5 мА. Точно так же можно определить, что при коллекторном напряжении 4,5 В для того, чтобы протекал коллекторный ток 8 мА (точка *В*), необходим ток базы в 80 мкА.

По выходным характеристикам можно найти *выходное сопротивление транзистора для постоянного и переменного токов*. Выходное сопротивление транзистора по переменному току особенно важно, поскольку на его основе происходит *согласование отдельных транзисторных ступеней*. Например, сопротивление по постоянному току в точке *Б* (рис. 20.5*а*) будет иметь значение:

$$R_Б = \frac{U}{I} = \frac{4,5}{45 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ кОм}.$$

Сопротивление по переменному току в той же точке можно найти по закону Ома, задавая соответствующие приращения (рис. 20.5*б*), где

$$\Delta U = 7 - 3 = 4 \text{ В}; \ \Delta I = 4,5 - 4,4 = 0,1 \text{ мА},$$

и, таким образом, получаем

$$R_Б = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{4}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 40 \text{кОм}.$$

Выходное сопротивление транзистора как по постоянному, так и по переменному току *сильно зависит от выбранной рабочей точки*. Практика показывает, что выходное сопротивление по переменному току в схеме с ОЭ обычно имеет значения от 20 до 50 кОм.

20.6. Выходные статические характеристики биполярного транзистора в схеме с ОБ

В данном случае характеристики выражают *зависимость коллекторного тока $I_К$ от выходного напряжения $U_{БК}$* (при определенном эмиттерном токе $I_Э$). Для их снятия можно использовать схему, показанную на рис. 20.6. На этом же рисунке показано семейство выходных характеристик транзистора МП42Б. Видно, что они похожи на выходные характеристики в схеме с ОЭ, но имеют два существенных различия. Во-первых, здесь коллекторный ток протекает даже и тогда, когда коллекторное напряжение равно нулю. Причина в том, что источник тока находится в цепи эмиттера. Во-вторых, здесь выходные характеристики более горизонтальны, чем в схеме с ОЭ, т. е. здесь *выходное сопротивление больше*. И действительно, практика пока-

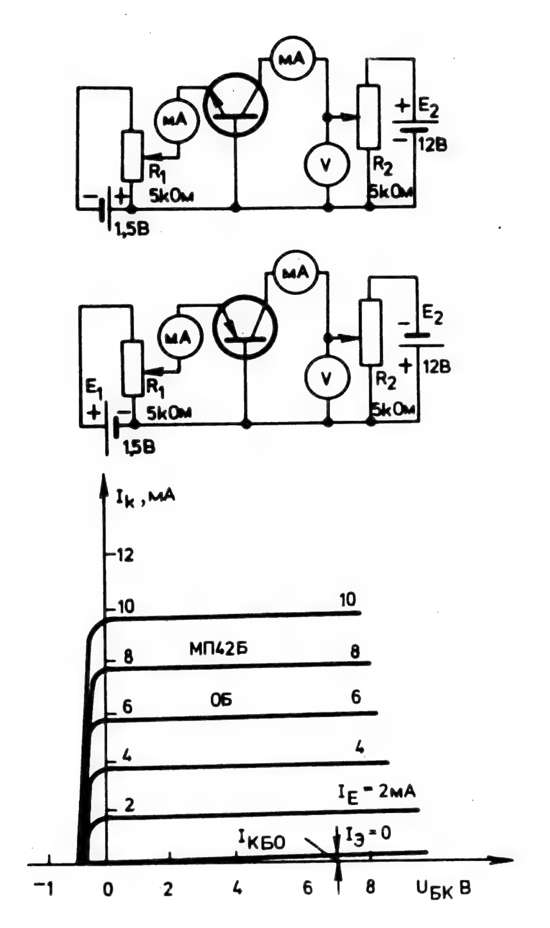
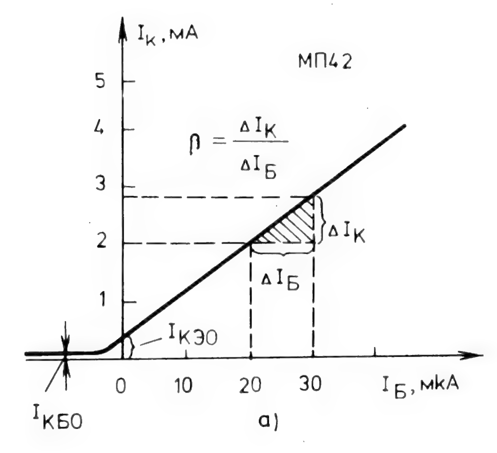


Рис. 20.6. Выходные статические характеристики в схеме с ОБ и схемы для снятия этих характеристик

зывает, что выходное сопротивление по переменному току транзистора в схеме с ОБ чаще всего имеет величину от 500 кОм до 2 МОм.

20.7. Статические характеристики прямой передачи по току

Эти характеристики представляют собой *связь между входным и выходным током*. Следовательно, в схеме с ОЭ они определяют связь между $I_Б$ и $I_К$ (это коэффициент β), а в схеме с ОБ между $I_К$ и $I_Э$ (это коэффициент α).



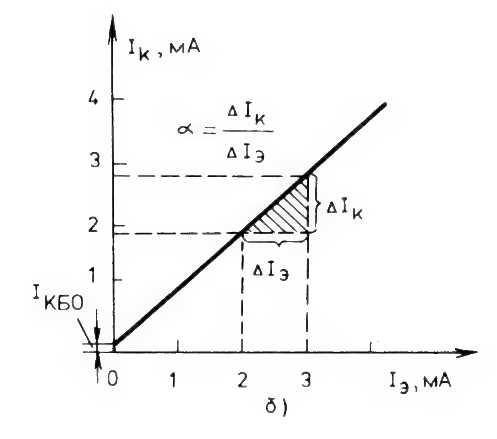


Рис. 20.7. Статические характеристики прямой передачи по току в схемах с ОЭ и ОБ

Обе упомянутые характеристики транзистора МП42Б даны на рис. 20.7.

20.8. Статические характеристики обратной передачи по напряжению

Они выражают графическую связь между входным и выходным напряжениями транзистора. И поскольку выходное напряжение оказывает слабое влияние на входное, эти характеристики почти горизонтальны (рис. 20.8).

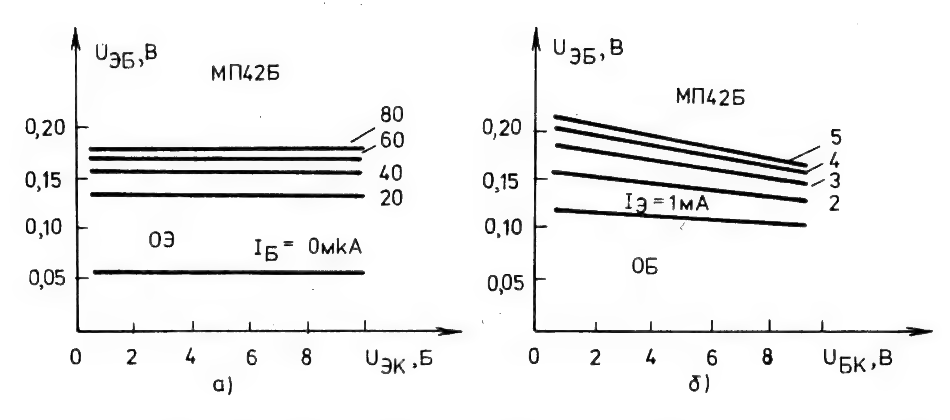
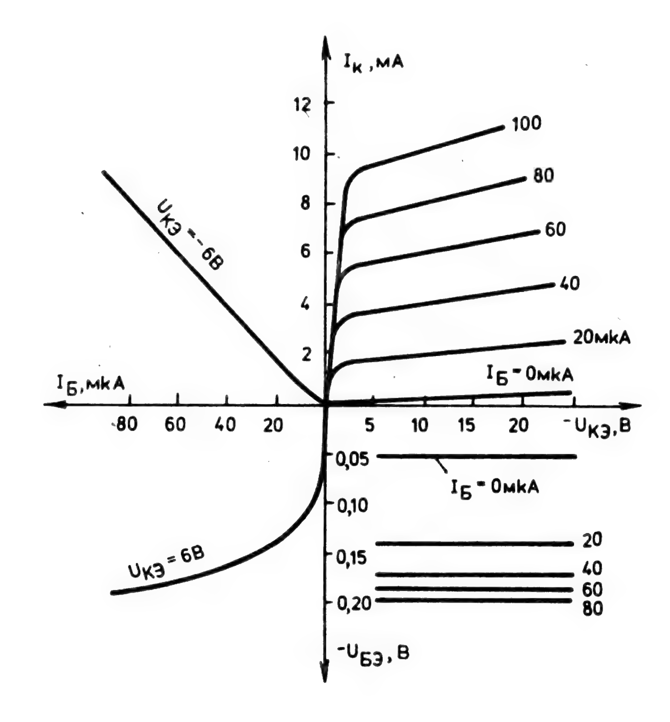


Рис. 20.8. Статические характеристики обратной передачи по напряжению в схеме с ОЭ и ОБ

20.9. Полные статические характеристики биполярных транзисторов

Упомянутые четыре вида характеристик транзисторов можно изобразить на одном чертеже. В этом случае масштабы величин любых двух соседних характеристик одинаковы. Это создает большое удобство при переносе рабочей точки с одной характеристики на другую для быстрого определения токов и напряжений. На рис. 20.9 показаны полные статические характеристики транзистора МП42Б.

Рис. 20.9. Полные статические характеристики биполярного транзистора



ЗАПОМНИТЕ!

1. **Графические характеристики выражают связь между напряжениями и токами в транзисторе. Они делают явления наглядными и дают возможность быстро и легко определить величину этих напряжений и токов. По ним легко находятся входное и выходное сопротивления транзистора по переменному току, важные для согласования отдельных транзисторных ступеней.**
2. **Входные характеристики определяют связь между входным напряжением и входным током. По ним видно, что в нормальном случае напряжение база-эмиттер в германиевых транзисторах (независимо от схемы соединения с ОЭ, ОБ или ОК) равно 0,1÷0,4 В, а в кремниевых 0,4÷0,8 В. Подача больших напряжений может привести к недопустимо большим токам через транзистор и возможному повреждению.**
3. **Выходные характеристики выражают связь между выходным напряжением и выходным током. По ним видно, что при коллекторных напряжениях бóльших, чем 0,4÷0,8 В, коллекторный ток практически не зависит от коллекторного напряжения, а зависит только от тока базы. Это еще раз подтверждает, что значительный ток коллектора управляется малым током базы.**

21 Анализ электронных схем

21.1. Почему используются синусоиды

При исследовании работы усилительных каскадов обычно подают на вход синусоидальное колебание и наблюдают явления во время положительного и отрицательного полупериодов. И тут же возникает вопрос: ведь при передаче речи и музыки напряжения и токи имеют сложную форму? Не создаем ли мы для усилителей „неестественную обстановку", когда исследуем их с помощью синусоидальных сигналов?

Мы уже знаем (см. рис. 12.8), что согласно теореме Фурьѐ даже и самое сложное *периодическое* колебание можно разложить на сумму множества синусоидальных колебаний. Они называются *гармоническими* и образуют *частотный спектр определенной ширины. Так что, если усилитель хорошо усиливает несколько определенных частот спектра (включительно и самую низкую и самую высокую)*, то, очевидно, он хорошо усиливает и самое сложное колебание.

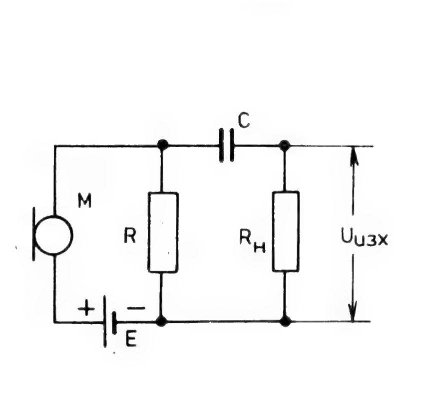
21.2. Постоянная и переменная составляющие

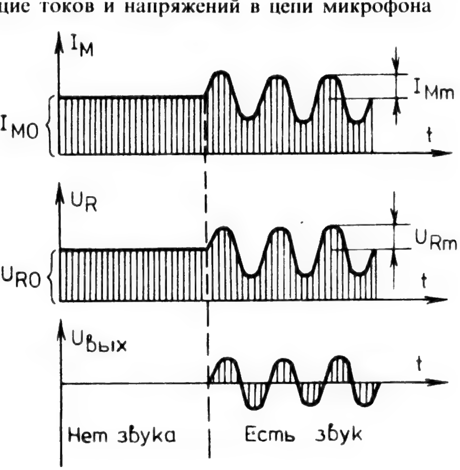
В п. 13 1 было упомянуто, что во время работы на различных участках электронных схем *действуют одновременно постоянные и переменные напряжения*. В результате в цепях протекает одновременно постоянный и переменный ток или, как еще говорится, *постоянная и переменная составляющие*. **Для того, чтобы правильно разобраться в действии электронных схем, абсолютно необходимо разграничить обе эти составляющие.** В связи с этим необходимо знать, что:

1. При отсутствии сигнала (звука) в цепи: батарея E — угольный микрофон M — сопротивление R (рис. 21.1) протекает постоянный микрофонный ток I_{M0}. На обоих концах резистора R образуется падение напряжения по постоянному току U_{R0}, но благодаря наличию конденсатора C на выходе нет напряжения.

2. При наличии сигнала (звука) в цепи E — M — R (рис. 21.1) протекает

Рис. 21.1. Постоянные и переменные составляющие токов и напряжений в цепи микрофона





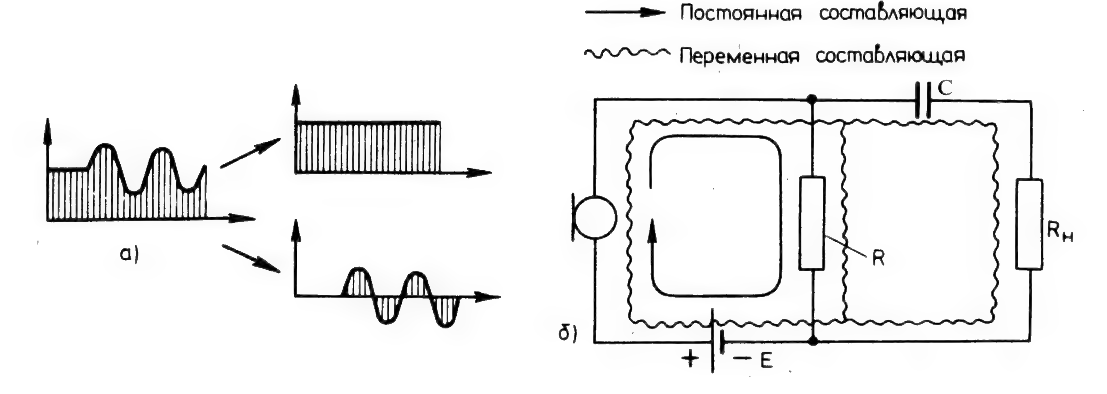


Рис. 21.2. *а*) общий ток в цепи состоит из постоянной и переменной составляющих; *б*) конденсатор не пропускает постоянную составляющую и через $R_н$ протекает только переменная составляющая

микрофонный ток, состоящий из постоянной составляющей I_{Mo} и переменной составляющей с амплитудой I_{Mm}.

На обоих концах сопротивления R образуется падение напряжения, состоящее из постоянной составляющей U_{Ro} и переменной составляющей с амплитудой U_{Rm}. Через конденсатор проходит переменная составляющая и появляется на выходе, причем ее амплитуда зависит от величины X_C и $R_н$.

3. Большая часть сложных колебаний состоит из постоянной и переменной составляющих (рис. 21.2*а*). Они могут быть разделены с помощью конденсатора (рис. 21.2*б*). *Переменная составляющая является носителем информации* (речь, музыка и пр.) и именно она усиливается отдельными каскадами.

4. Источник постоянной составляющей — батарея (источник питания), в то время как источник переменной составляющей — микрофон, магнитофонная головка, транзистор и пр.

5. Для переменной составляющей батарея (источник тока) представляет собой *короткое замыкание*. И действительно, все батареи питания, а также выход каждого выпрямителя тока шунтируются конденсатором большой емкости.

21.3. Полярность напряжений и токов в электронных схемах

При анализе электронных схем особенно важно знать полярности напряжения и тока. Начинающие любители электроники очень часто встречают затруднения в связи с тем, что в цепи протекают одновременно как постоянные, так и переменные составляющие. Поэтому следует знать, что:

1. Напряжения в различных точках электронных схем измеряют относительно общего проводника (шасси).

2. При протекании тока через данный резистор точка, в которую ток „входит“, имеет более высокий потенциал, чем точка, через которую он „выходит“ (см. рис. 4.5).

3. За положительное направление тока в замкнутых цепях схемы принимается условно одно направление, выбранное предварительно. Если направление реальных токов совпадает с условно выбранным, то они положительны, а если противоположно — они отрицательны.

4. При отсутствии сигнала в цепях существует только постоянная составляющая напряжения и тока. Когда проверяем при помощи вольтметра и

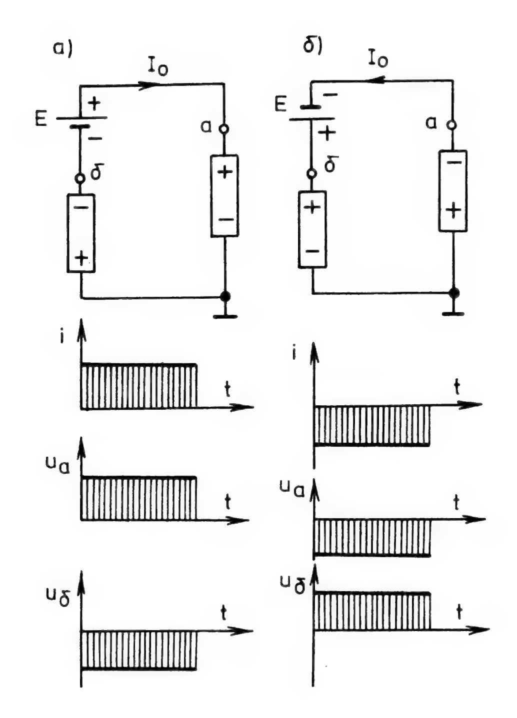


Рис. 21.3. *а*),) полярность постоянной составляющей

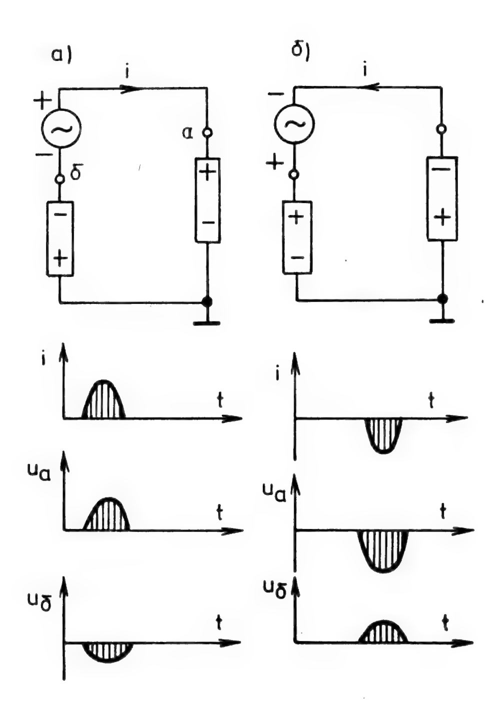


Рис. 21.4. *а*), *б*) полярность переменной составляющей

амперметра режим данной схемы, то мы измеряем именно постоянную составляющую. Для данной схемы полярность и направление постоянной составляющей во время работы остаются неизменными.

5. При наличии сигнала в цепях появляется переменная составляющая. Она непрерывно изменяется, а именно; в один полупериод она имеет одну полярность и направление, а в следующий — другую.

На рис. 21.3*а* и *б* показаны цепи, содержащие только постоянную составляющую. Здесь и в последующих схемах за положительную полярность выбрано направление по часовой стрелке. Под ними на основании упомянутого правила даны графики токов и полярность напряжений в точках *а* и *б*.

На рис. 21.4 показана цепь, содержащая только переменную составляющую. Под схемами начерчены графики токов и дана полярность напряжений в точках *а* и *б* в один и другой полупериод.

На рис. 21.5 показана цепь, содержащая одновременно и постоянную и переменную составляющие, причем постоянная составляющая положительна. И здесь начерчены графики токов и обозначена полярность напряжений в точках *а* и *б*.

Обратите внимание на то, что в один полупериод постоянная и переменная составляющие имеют одно направление, благодаря чему абсолютное значение токов и напряжений возрастает. В другой полупериод постоянная и переменная составляющие имеют противоположное направление, благодаря чему абсолютная величина токов и напряжений уменьшается. На рис. 21.6 показана та же цепь, однако ее постоянная составляющая отрицательна.

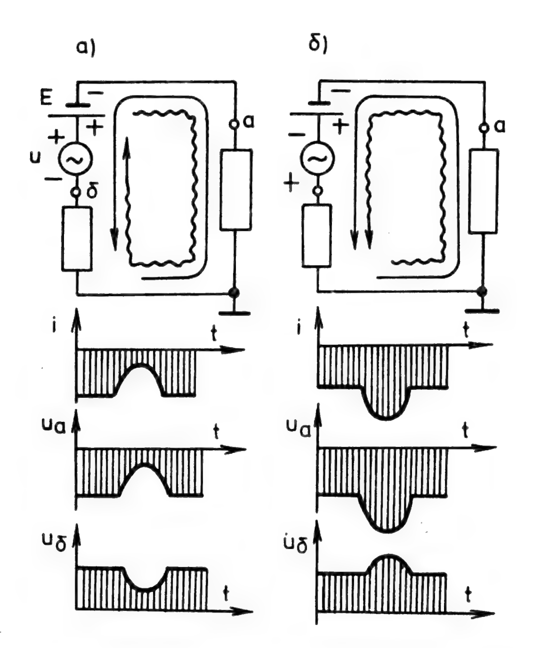


Рис. 21.5. *а*), *б*) полярности постоянной и переменной составляющих тока и напряжения в точках а и б

Рис. 21.6. *а*), *б*) полярности постоянной и переменной составляющих при обратном включении источника тока

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Несмотря на то, что реальные звуки имеют сложный характер, при исследовании усилителей используем синусоидальные колебания. Поступаем так, поскольку любое сложное периодическое колебание состоит из определенного количества синусоидальных колебаний, называемых гармониками.**
2. **При отсутствии сигнала в цепях любой схемы существует только постоянная составляющая. При настройке и ремонте схемы мы измеряем миллиамперметром и вольтметром именно постоянную составляющую напряжения и тока. Во время работы схемы направление постоянной составляющей не изменяется и обусловлено только источниками питания.**
3. **При наличии сигнала в цепях существуют одновременно постоянная и переменная составляющие, при этом в один полупериод они имеют одно направление и суммируются, а в другой — противоположное направление и вычитаются.**
4. **Источники тока (они всегда шунтированы конденсатором большой емкости) представляют собой короткое замыкание для переменной составляющей. Это означает, что для переменной составляющей „плюс“ и „минус“ любой схемы замкнуты накоротко.**

22 Биполярный транзистор в роли линейного усилителя

22.1. Общие сведения

В 19 главе мы выяснили, что устройство является усилителем тогда, когда мощность, полученная на его выходе, больше мощности, поданной на вход, причем, разумеется, увеличение мощности происходит за счет источника тока. При помощи транзисторов можно конструировать различные виды электронных усилителей, но наиболее широкое применение на практике находят *линейные усилители* (они работают в т. н. усилительном классе *A*). В них переменный выходной сигнал (хотя и многократно увеличенный по мощности) должен иметь ту же форму, что и входной (рис. 22.1). Или, как говорится, между выходным и входным сигналом должна существовать линейная зависимость (отсюда и их название: линейные усилители).

22.2. Транзистор в роли усилителя

Для того, чтобы конкретно понять, как усиливает транзистор, рассмотрим схему, данную на рис. 22.2*а*, в которой в коллекторную цепь включено *нагрузочное сопротивление* $R=2$ кОм. На одном числовом примере покажем, что мощность (напряжение и ток) переменной составляющей на нагрузке больше,

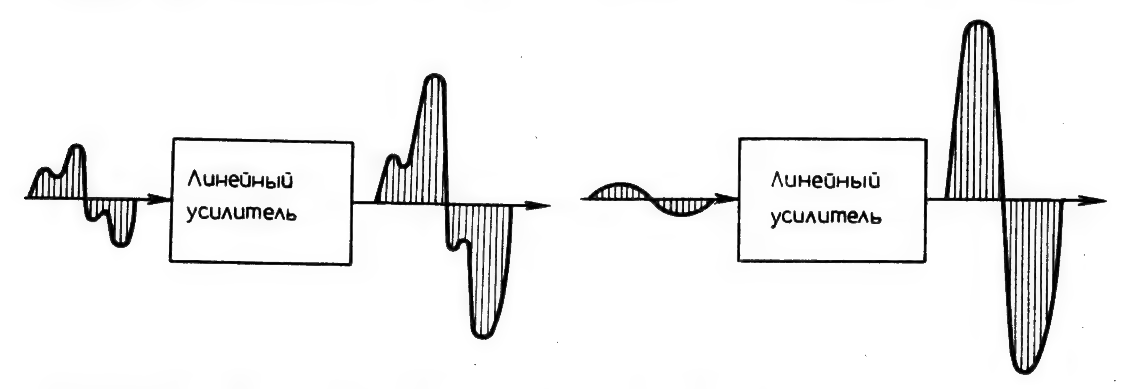


Рис. 22.1. Хороший усилитель не должен изменять форму усиливаемого сигнала

чем мощность (напряжение и ток) на входе.

Сначала рассмотрим схему, данную на рис. 22.2*а*. Здесь база транзистора соединена с эмиттером ($I_Б=0$), благодаря чему при отсутствии сигнала транзистор закрыт и $I_К \approx 0$. (Для простоты пренебрегаем ничтожно малым током $I_{КЭК}$.) Сопротивление коллектор-эмиттер любого закрытого транзистора велико, примерно $0,1 \div 1$ МОм. Благодаря этому почти все напряжение батареи действует между коллектором и эмиттером ($U_{КЭ} \approx 9$ В), а падение напряжения на резисторе почти равно нулю ($U_R \approx 0$).

Если теперь от источника переменного тока E_I (рис. 22.2 *б*) подадим на

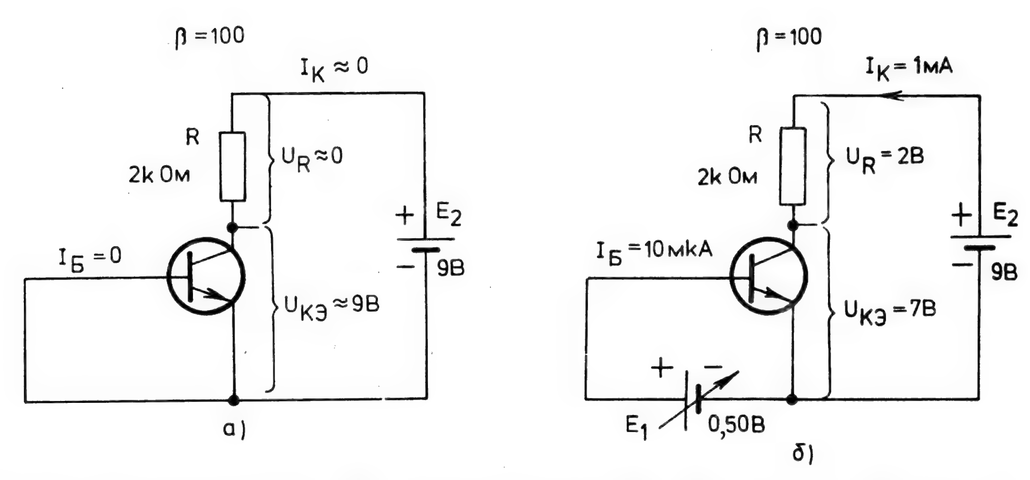


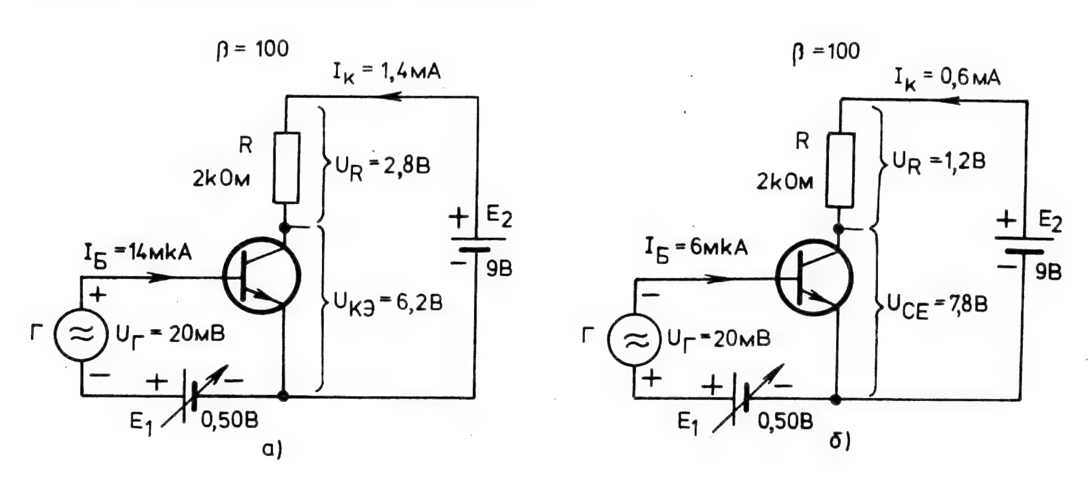
Рис. 22.2. *а*) при отсутствии тока базы транзистор заперт (коллекторный ток не протекает), при этом коллекторное напряжение почти равно напряжению питания; *б*) при определенном токе базы транзистор открыт (протекает определенный коллекторный ток), при этом коллекторное напряжение меньше напряжения питания

вход напряжение 0,50 В, то оно вызовет сравнительно малый базовый ток $I_Б = 10$ мкА. (Это можно установить по входной характеристике транзистора). Поскольку выбранный транзистор имеет $\beta = 100$, из его основного свойства следует, что коллекторный ток равен $I_K \approx \beta I_Б = 100.10 = 1000$ мкА = 1 мА. Этот ток на сопротивлении R образует падение напрежения $U_R = I_K R = 1.10^{-3}.2.10^3 = 2$ В, а напряжение коллектор-эмиттер будет $U_{KЭ} = E_2 - U_R = 9 - 2 = 7$ В (рис. 22.2*б*).

Теперь на вход этой схемы включим генератор, который будет производить синусоидальные колебания с амплитудой $U_Г = 20$ мВ, и проследим за ее работой.

а) Положительный полупериод (рис. 22.3*а*). В этом случае напряжение генератора *будет суммироваться* с напряжением источника тока E_1, и на управляющий переход транзистора будет действовать напряжение

Рис. 22.3. *а*) во время положительного полупериода генератора базовый ток возрастает. Это приводит к увеличению коллекторного тока и к уменьшению коллекторного напряжения; *б*) во время отрицательного полупериода генератора базовый ток уменьшается. Это приводит к уменьшению коллекторного тока и увеличению коллекторного напряжения



$U_{БЭ} = U_{E1} + U_{Г} = 0{,}5 + 0{,}02 = 0{,}52$ В. Базовый ток увеличится до $I_Б = 1{,}4$ мкА (это видно из входной характеристики), и коллекторный ток будет $I_K = \beta I_Б = 100.14 = 1400$ мкА $= 1{,}4$ мА. Этот ток образует на сопротивлении R падение напряжения $U_R = I_K R = 1{,}4.10^{-3}.2.10^3 = 2{,}8$ В, а напряжение коллектор-эмиттер будет $U_{КЭ} = E_2 - I_K R = 9 - 2{,}8 = 6{,}2$ В.

б. Отрицательный полупериод (рис. 22.3*б*). В этом случае напряжение генератора *будет вычитаться* из напряжения источника тока E_1, а на управляющий переход транзистора будет действовать напряжение $U_{БЭ} = U_{E1} - U_{Г} = 0{,}50 - 0{,}02 = 0{,}48$ В. От этого ток базы уменьшится до $I_Б = 6$ мкА (устанавливаем по входной характеристике), и коллекторный ток будет $I_K = \beta I_Б = 100 \,.\, 6 = 600$ мкА $= 0{,}6$ мА. Этот ток создаст на сопротивлении R падение напряжения $U_R = I_K \,.\, R = 0{,}6 \,.\, 10^{-3} \,.\, 2 \,.\, 10^3 = 1{,}2$ В, а напряжение коллектор-эмиттер будет $U_{КЭ} = E_2 - I_K \,.\, R = 9 - 1{,}2 = 7{,}8$ В.

Если сравнить оба состояния, данные на рис. 22.3, с исходным состоянием схемы, данном на рис. 22.2*б*, можно сделать следующие выводы:

1. При отсутствии сигнала напряжение на управляющем переходе транзистора — 0,50 В, а базовый ток равен 10 мкА. Коллекторный ток равен 1 мА, падение напряжения на нагрузочном сопротивлении равно 2 В, а напряжение на коллекторе — 7 В.

2. При подаче входного сигнала с амплитудой 20 мВ переменная составляющая базового тока имеет амплитуду 4 мкА, а амплитуда коллекторного тока равна 0,4 мА. Следовательно, *коэффициент усиления по току* этой ступени равен

$$K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{0{,}4 \,.\, 10^{-3}}{4 \,.\, 10^{-6}} = 100 \text{ раз.}$$

3. При подаче сигнала падение напряжения на нагрузочном сопротивлении равно падению напряжения на транзисторе (во сколько раз увеличивается U_R, во столько раз уменьшается $U_{КЭ}$ и обратно). Именно оно является выходным сигналом каскада и в данном случае имеет амплитуду 0,8 В. И поскольку входной сигнал имеет амплитуду 20 мВ, то *коеэффициент усиления по напряжению будет*

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{0{,}8}{20 \,.\, 10^{-3}} = 40 \text{ раз.}$$

4. Поскольку мощность является произведением напряжения и тока, *коеффициент усиления по мощности* этого каскада равен $K_p = K_u K_i = 40 \,.\, 100 = 4000$ раз.

22.3. Рабочая точка транзистора

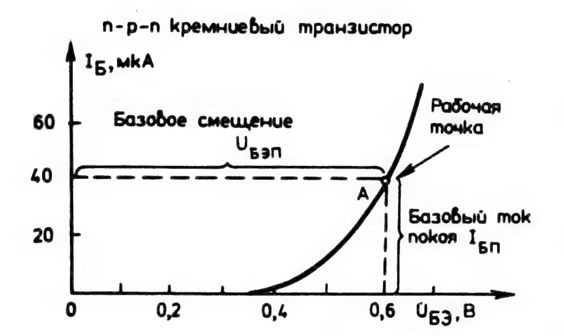
Для того, чтобы транзистор выполнял роль усилителя, он *должен быть поставлен в соответствующий режим по постоянному току* и тогда можно подать на него входной сигнал. Основные величины, характеризующие режим постояного тока, следующие:

1. Напряжение управляющего перехода в режиме покоя. Называется еще *базовым смещением и обозначается* $U_{ЭБп}$ или $U_{БЭп}$ (здесь и далее „п“ означает покой).

2. Базовый ток покоя $I_{Бп}$. Очевидно, он зависит от выбранного смещения базы $U_{БЭп}$, и обе эти величины определяют т. н. *рабочую точку транзистора* на его входной характеристике (рис. 22.4).

3. Коллекторный ток покоя $I_{Кп}$. Как мы уже знаем, его величина в β раз больше начального тока базы.

4. Коллекторное напряжение покоя $U_{КЭп}$. Оно не должно быть меньше $0{,}8 \div 1$ В, т. к. из рис. 20.4 видно, что при очень малых напряжениях базовый ток не управляет коллекторным (характеристики сливаются в одну линию), т. е. транзистор перестает быть усилителем. Обе последние величины ($I_{Кп}$ и $U_{КЭп}$) определяют *рабочую точку*



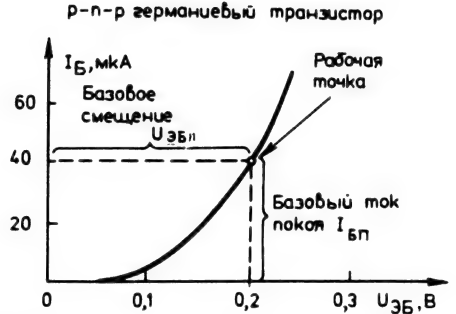
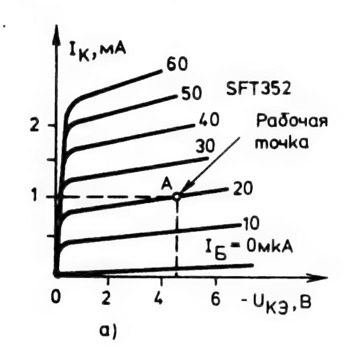


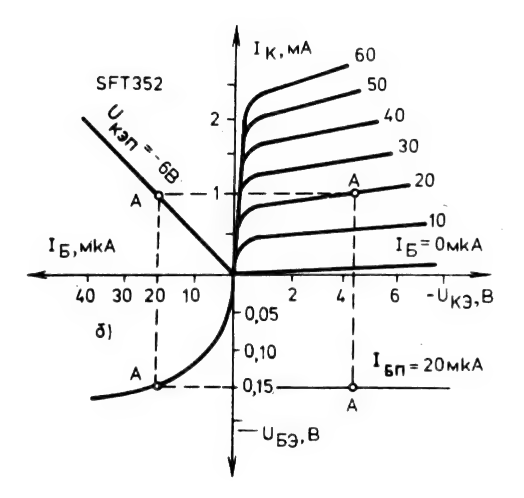
Рис. 22.4. Рабочая точка на входной характеристике определяется базовым напряжением смещения $U_{БЭп}$ и базовым током $I_{БА}$

на выходных характеристиках транзистора (рис. 22.5*а*).

Сразу надо подчеркнуть, что при

Рис. 22.5. *а*) рабочая точка на выходной характеристике определяется коллекторным напряжением $U_{КЭп}$ и коллекторным током $I_{Кп}$; *б*) рабочую точку можно выбрать и по четырем статическим характеристикам





данном режиме по постоянному току *транзистор имеет одну рабочую точку, которая может быть изображена или на входной или на выходной характеристике* (а также и на остальных характеристиках). Это объясняется тем, что вышеупомянутые четыре величины $U_{БЭп}$, $I_{Бп}$, $I_{Кп}$ и $U_{КЭп}$ не могут быть произвольными, а связаны между собой.

На практике (например, в справочниках) рабочая точка чаще всего задается посредством коллекторного тока $I_{Кп}$ и коллекторного напряжения $U_{КЭп}$.

На рис. 22.5*б* на выходных характеристиках изображена рабочая точка *А*, соответствующая $I_{Кп}=1$ мА и $U_{КЭп}=-4{,}5$ В. Проектируем эту точку на остальные характеристики. По входной характеристике определяем, чтобы иметь $I_{Кп}=1$ мА, надо, чтобы $I_{Бп}=20$ мкА, а для этого транзистор должен иметь напряжение смещения $U_{ЭБп}=0{,}15$ В.

22.4. Почему важен выбор рабочей точки?

Правильный выбор рабочей точки является одним из самых важных моментов в работе с транзисторными схемами. Причины этого следующие.

При подаче определенного напряжения смещения $U_{ЭБп}$ (или при протекании определенного тока базы $I_{Бп}$) определяется рабочая точка на входной

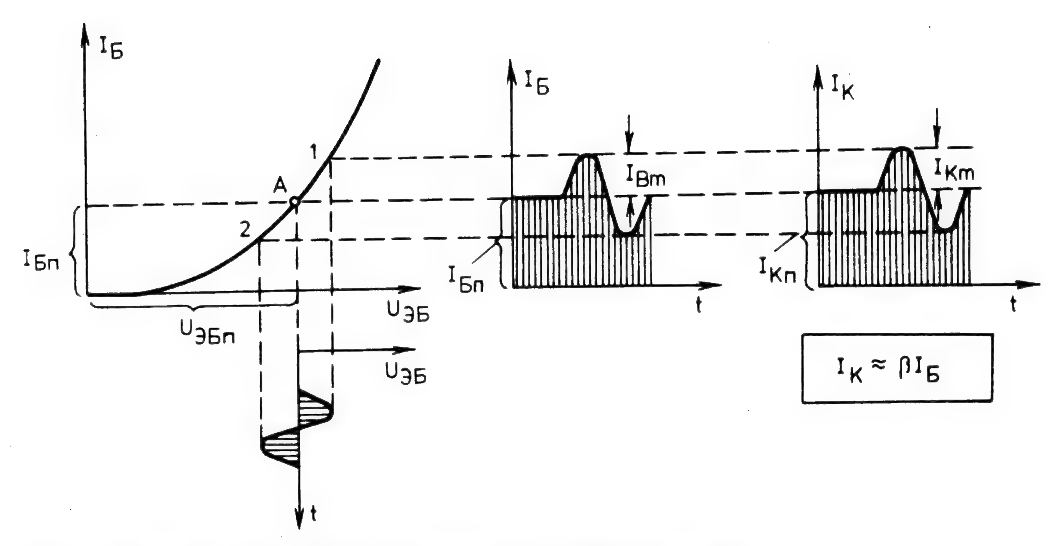
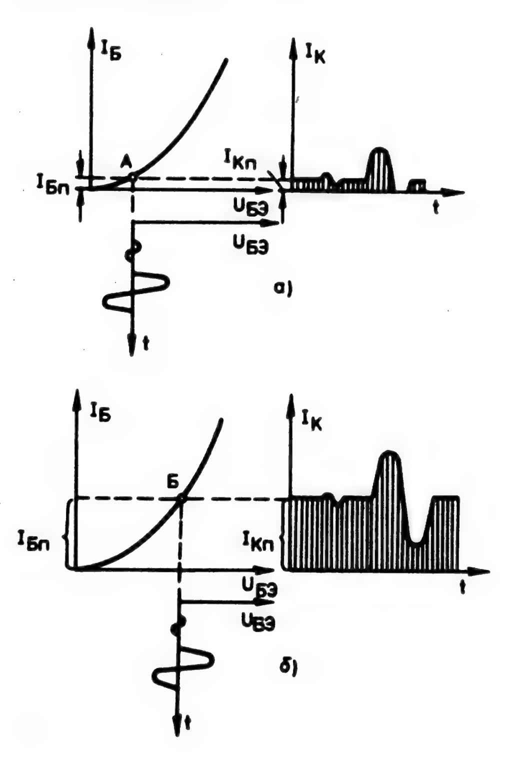


Рис. 22.6. Рабочая точка на входной характеристике выбрана правильно

характеристике, тем самым определяется и начальный коллекторный ток

Рис. 22.7. *а*) при выбранной таким образом рабочей точке можно усиливать без искажений только малые сигналы; *б*) при таком выборе рабочей точки базовый (или коллекторный) ток относительно большой



$I_{Кп}$. При подаче входного сигнала напряжение управляющего перехода становится то больше, то меньше, а рабочая точка движется в промежутке между точками 1 и 2 (рис. 22.6) и своими проекциями на ось ординаты вычерчивает амплитуды $I_{Бm}$ переменной сос-

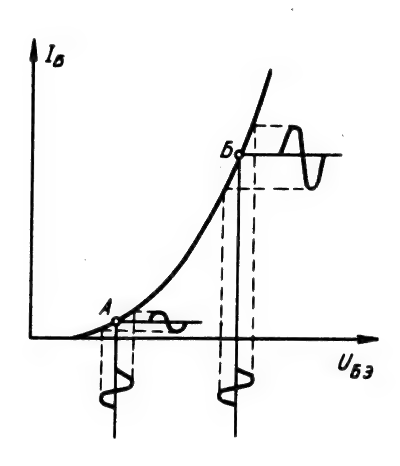


Рис. 22.8. В рабочей точке Б крутизна транзистора больше крутизны в точке *А*

тавляющей тока базы. На этом же рисунке показан и коллекторный ток покоя $I_{Кп}$ и амплитуда $I_{Кm}$ его переменной составляющей (обратите внимание, что они в β раз

больше, поскольку масштабы $I_К$ и $I_Б$ различны).

Входная характеристика транзистора нелинейна, благодаря чему ее *крутизна различна на различных участках*. Поэтому, если выбрать другую рабочую точку, то один и тот же переменный входной сигнал вызовет переменный базовый (или коллекторный) ток с амплитудой другой величины (рис. 22.7). На первый взгляд кажется, что всегда выгоднее выбрать рабочую точку в правой части рабочей характеристики (точка *Б* на рис. 22.7), где крутизна транзистора больше. Однако, при бóльшем начальном базовом (коллекторном) токе входное сопротивление транзистора уменьшается (см. т. 21.3), а это очень важно, поскольку нарастает *нагрузочное сопротивление по переменному току предыдущего каскада* и приводит к уменьшению усиления.

Выбор рабочей точки находится в тесной зависимости от амплитуды усиливаемого сигнала. Например, рабочая точка *А* (рис.22.8*а*) выбрана правильно при условии, что сигнал мал, в то время как при большом сигнале (его амплитуда больше постоянной составляющей) получаются искажения. На рис. 22.8*б* рабочая точка *Б* выбрана правильно для большого сигнала, в то время как при малом сигнале этот режим неэкономичен и, кроме того, входное сопротивление будет малым. На практике (если нет каких-нибудь специальных требований) в маломощных транзисторных линейных усилителях очень часто рекомендуется рабочая точка $I_{Кп} = 1$ мА и $U_{КЭп} = 1 \div 3$ В, причем усилительный каскад имеет оптимальные параметры (коэффициент усиления, входное сопротивление и пр.). В этом режиме и при использовании транзисторов с $\beta = 100 - 150$ можно получить $K_u = 50 \div 100$, $K_i = 100 \div 150$ и $K_p = 2000 \div 6000$.

В ряде случаев транзистор используется в качестве нелинейного усилителя, т. е. выходной сигнал отличается по форме от входного. В связи с этим различаем несколько классов усиления. Практически этого мы добиваемся именно путем выбора рабочей точки.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **В линейных усилителях (усилители, работающие в т. н. усилительном режиме класса *А*), выходной переменный сигнал, даже и увеличенный во много раз по мощности, должен иметь ту же самую форму, что и входной.**
2. **Для того, чтобы транзистор мог усиливать, он должен быть поставлен в определенный режим по постоянному току или, как говорится, ему надо обеспечить соответствующую рабочую точку. Практически это осуществляется подачей определенного смещения, т. е. обеспечивается прохождение определенного базового тока покоя. О самой рабочей точке обычно судят по коллекторному току покоя $I_{Кп}$ и коллекторному напряжению покоя $U_{КЭп}$.**
3. **На практике в маломощных линейных усилителях (если нет специальных требований) часто рекомендуется рабочая точка $I_{Кп} = 1$ мА и $U_{КЭп} = 1 \div 3$ В, для которой параметры усилительного каскада (коэффициент усиления, входное сопротивление и пр.) оптимальны.**
4. **В некоторых случаях транзистор используется как нелинейный усилитель, в котором форма выходного переменного сигнала отличается от формы входного (например, классы усиления *АВ, В, С* и пр.) Это достигается выбором подходящей рабочей точки.**

23 Схемы для обеспечения выбранной рабочей точки транзисторных предварительных каскадов

23.1. Общие сведения

Нам уже известно, что важнейшими источниками электрических сигналов являются микрофоны, электрические мембраны, магнитофонные головки, приемные антенны и пр. Напряжение, получаемое от этих источников, очень мало (примерно от 10 мкВ до 100 мВ) и для того, чтобы сработал громкоговоритель, оно должно быть усилено. Для этого используются электронные усилители, которые обычно состоят из нескольких каскадов (ступеней). Первые несколько ступеней во всех усилителях называются *предварительными*, и в них сигнал сравнительно мал (примерно от 100 мкВ до 0,5 В). Последний каскад в любом усилителе называется *выходным* (или усилителем мощности), и в нем напряжение сигнала имеет значительную величину (примерно от 1 В до 10 В).

Перед тем, как усиливать, каждый каскад должен быть настроен на определенный режим по постоянному току и только тогда следует подавать сигнал. В этой главе кратко рассмотрим схемы, предназначенные для обеспечения режима по постоянному току (т. е. рабочей точки) предварительных каскадов.

Основные требования к любой схеме, обеспечивающей рабочую точку транзистора, следующие:

1. Схема должна питаться от одного источника тока.
2. Должно быть обеспечено соответствующее напряжение смещения, т. е. необходимый начальный ток базы.
3. Должна быть обеспечена соответствующая цепь для переменного входного сигнала, чтобы он мог воздействовать на управляющий эмиттерный переход.

В 19 главе упоминалось, что одной из основных особенностей любого транзисторного каскада является его температурная стабильность. С учетом этого схемы для обеспечения рабочей точки транзистора бывают нестабилизированными и стабилизированными.

23. 2. Схема с фиксированным напряжением

Из рис. 23.1 видно, что эта схема содержит небольшое количество элементов. Тонкими линиями обозначен путь базового тока покоя $I_{Бп}$ и в β раз большего коллекторного тока покоя $I_{Кп}$.

Здесь выбор необходимой рабочей точки производится подбором соответствующего сопротивления R_l. Чем меньше это сопротивление, тем больше базовый (коллекторный) начальный ток. Поскольку сопротивление по постоянному току управляющего перехода намного меньше значения R_l, для определения величины последнего можно использовать формулу

$$R_l = \frac{\beta e}{I_{Kn}}. \qquad (23.1)$$

Пример 23.1. Какое значение должно иметь сопротивление R_l, если транзистор имеет $\beta = 80$ и $E = 6$ В, а

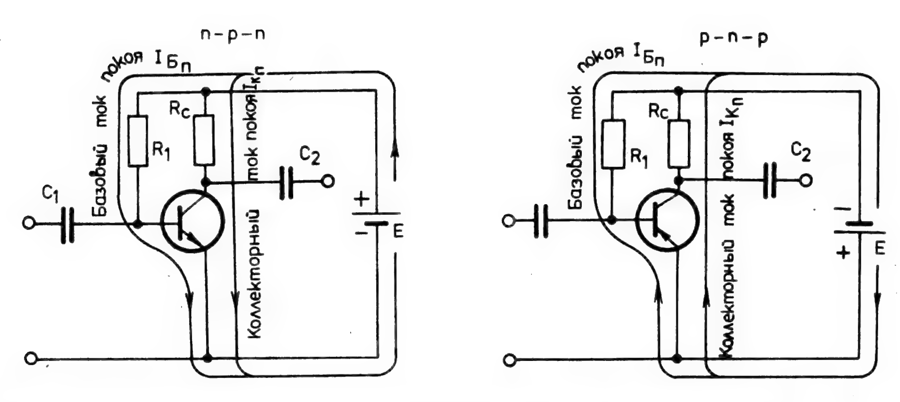


Рис. 23.1. Нестабилизированная схема обеспечения базового тока в рабочей точке

выбранный коллекторный ток покоя равен $I_{Kn}=1$ мА.

Подставляем данные в формулу (23.1):

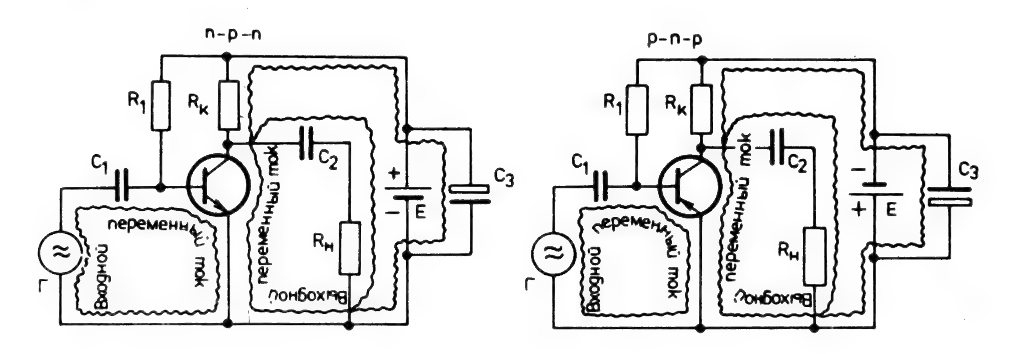
$$R_I=\frac{\beta E}{I_{Kn}}=\frac{80\,.\,6}{1\,.\,10^{-3}}=480 \text{ кОм}.$$

На рис. 23.2 показан путь входного переменного тока (при наличии входново сигнала), который протекает через управляющий переход транзистора. Значение конденсатора C_I выбирается так, чтобы для входного сигнала самой низкой частоты емкостное сопротивление X_{CI} было значительно меньше сопротивления управляющего перехода по переменному току. На том же рисунке показан выходной переменный ток, генерированный транзистором и в β раз больший, чем входной. Здесь конденсаторы C_2 и C_3 выбираются достаточно большими, так что практически представляют короткое замыкание для этого тока. Обратите внимание, что выходной переменный ток разветвляется по коллекторному сопротивлению R_K и $R_н$ и (здес $R_н$ обозначено входное сопротивление следующего каскада по переменному току), т. е. для переменной составляющей R_K и $R_н$ соединены параллельно. Таким образом, нагрузочным сопротивлением транзистора для постоянной составляющей является R_K, а нагрузочное сопротивление для переменной составляющей $R_\sim$ равно

$$R_\sim=\frac{R_K\,.\,R_H}{R_K+R_H}. \qquad (23.2)$$

И поскольку усиление транзисторного каскада тем больше, чем больше его нагрузочное сопротивление по переменному току, ясно, что входное сопротивление следующего каскада не должно быть малым. Например, если $R_K=4$ кОм, а $R_н=1$ кОм, то $R_\sim=800$

Рис. 23.2. Цепи, по которым протекает входной переменный ток и усиленный переменный выходной ток



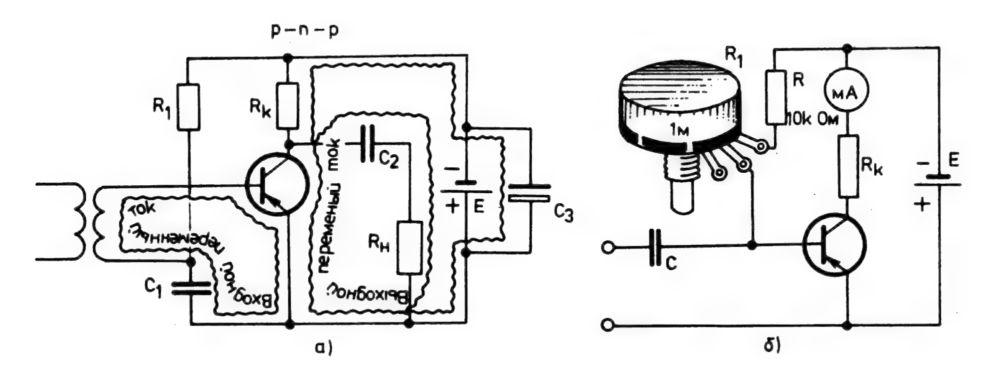


Рис. 23.3. *а*) цепи переменного тока во входной и выходной цепях; *б*) практический способ определения необходимых значений базового резистора

Ом. Однако, если $R_K = 4$ кОм, а $R_н = 4$ кОм, то $R_{\sim} = 2$ кОм и усиление будет почти в 2,5 раза больше.

Исходя из вышесказанного, значение коллекторного сопротивления выбирается (в зависимости от напряжения питания E) чаще всего от 1 до 6 кОм; при этом надо следить, чтобы коллекторное напряжение $U_{КЭп}$ было не менее $1 \div 2$ В.

Одна из разновидностей рассмотренной выше схемы дана на рис. 23.3*а*. Разница здесь в том, что входной сигнал подается посредством трансформаторной связи.

На рис. 23.3*б* показан один практический способ определения необходимой величины базового сопротивления R_I. Потенциометр имеет значение 1 МОм и с его помощью устанавливается коллекторный ток 1 мА, а сопротивление $R = 10$ кОм — предохранительное. После этого омметром измеряется значение потенциометра и на его место припаивается необходимое базовое сопротивление.

23.3. Схема с параллельной отрицательной обратной связью

Эта схема очень похожа на только что рассмотренную, только здесь базовое сопротивление подсоединено не к источнику тока, а к коллектору (рис. 23.4). Путем такого соединения получается т. наз. *отрицательная обратная связь*, которая улучшает температурную стабильность каскада. И действительно, если по какой-либо причине коллекторный ток покоя начнет увеличиваться, падение напряжения на R_K будет увеличиваться, а коллекторное напряжение $U_{КЭ}$ начнет уменьшаться по абсолютной величине. Это приведет к уменьшению тока базы (базовая цепь будет питаться из точки с меньшим напряжением) и вызовет соответственно уменьшение коллекторного тока. Если коллекторный ток покоя начнет уменьшаться, то явления протекают в обратном направлении и появляется тенденция к его увеличению.

Значение базового сопротивления может быть определено по формуле

$$R_I = \frac{E - R_K I_{Kп}}{I_{Kп}} \beta. \qquad (23.3)$$

Пример 23.2. Найти значение R_I (рис. 23.4), если $E = 9$ В, $R_K = 3$ кОм, $I_{Kп} = 1$ мА; $\beta = 100$.
Подставляем данные в формулу (23.3):

$$R_I = \frac{E - R_K I_{Kп}}{I_{Kп}} . \beta = \frac{9 - 3.10^3.1.10^{-3}}{1.10^{-3}} .100 =$$
$$= 600 \text{ кОм}.$$

В этой схеме коллекторное сопротивление тоже выбирается (в зависимости от питания E) обычно от 1 до

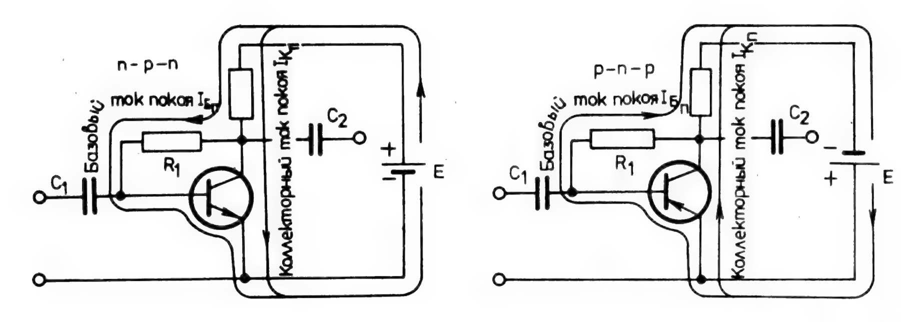


Рис. 23.4. Цепи, по которым протекает базовый и коллекторный ток в схеме с параллельной отрицательной обратной связью

6 кОм, причем коллекторное напряжение не должно быть менее 1÷2 В.

23.4. Схема с последовательной отрицательной обратной связью

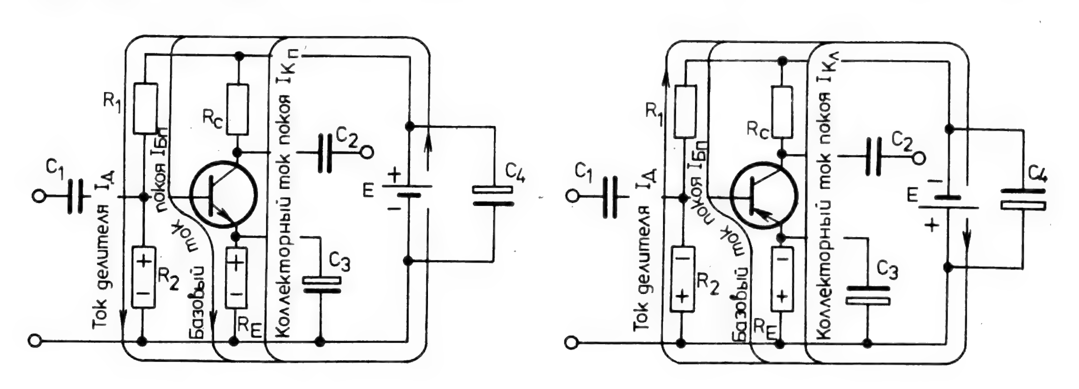
Эта схема (рис. 23.5) на практике используется чаще всего, поскольку она обеспечивает наилучшую температурную стабильность. Здесь напряжение смещения транзистора обеспечивается делителем $R_1 - R_2$ и эмиттерным сопротивлением $R_Э$. Кроме того, эмиттерное сопротивление обеспечивает и отрицательную обратную связь, которая улучшает температурную стабильность каскада. В режиме покоя здесь протекают три тока: ток через делитель $I_Д$, ток базы $I_{Бп}$, коллекторный ток $I_{Кп}$. Напряжение смещения транзистора $U_{БЭп}$ равно разности между падением напряжения на R_2 и падением напряжения на $R_Э$, т.е. $U_{ПЭп} = U_{R2} - U_{RЭ}$. В нормальном режиме падение напряжения на R_2 должно быть всегда больше падения напряжения на $R_Э$ в германиевых транзисторах примерно на 0,1÷0,4 В, а в кремниевых — на 0,4÷0,8 В.

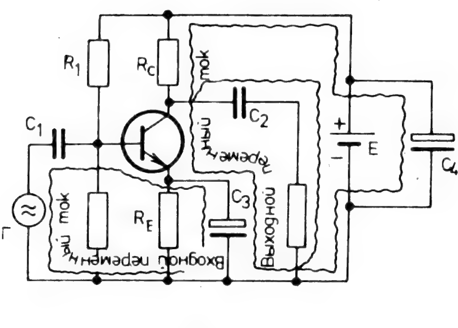
Значение сопротивления $R_Э$ выбирается обычно от 500 Ом до 5 кОм, причем, при бо́льших значениях температурная стабильность каскада лучше.

Конденсатор C_3 должен иметь достаточно большую емкость, т. к. через него проходит как входной, так и выходной переменный сигнал (рис. 23.6), и для них он должен иметь ничтожно малое сопротивление.

Ток через делитель выбирается обычно в 2÷10 раз больше тока покоя базы $I_{Бп}$, при этом бо́льшие значения рекомендуются, если необходимо обес-

Рис. 23.5. Цепи, по которым протекает базовый и коллекторный ток в схеме с последовательной отрицательной обратной связью





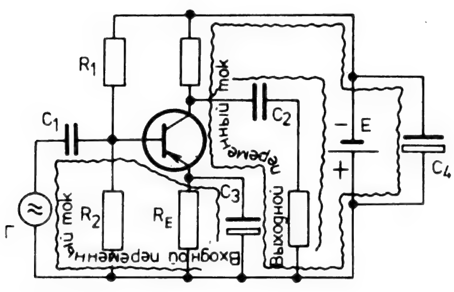


Рис. 23.6. Цепи, по которым протекает переменный входной и выходной ток

печить наилучшую температурную стабильность. Чаще всего $R_1 = 10$ кОм $\div$ 100 кОм, а $R_2 = 3$ кОм $\div$ 20 кОм.

Сопротивление R_K чаще всего имеет значение 1 кОм $\div$ 6 кОм, а коллекторное напряжение $U_{КЭп}$ во всех случаях не должно быть меньше 1 $\div$ 2 В.

Следует еще добавить, что настройка схемы с целью получения определенного коллекторного тока, осуществляется лучше всего подбором сопротивления R_1.

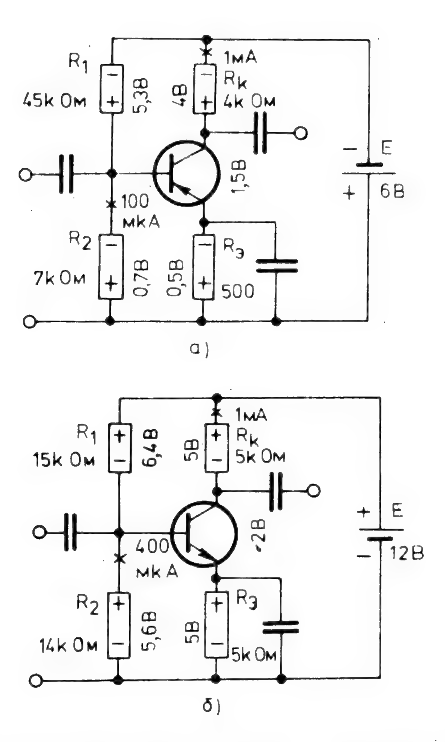


Рис. 23.7 Величина токов и напряжений в конкретной схеме

На рис. 23.7 показаны две конкретные схемы, на которых для лучшей наглядности обозначены токи и напряжения. Вторая схема имеет лучшую температурную стабильность, чем первая, поскольку сопротивление $R_Э$ больше.

ЗАПОМНИТЕ!

1. Для того, чтобы усиливать сигналы, любой каскад должен быть обеспечен соответствующим режимом по постоянному току, т. е. транзистор должен иметь правильно выбранную рабочую точку.

2. В любом усилительном каскаде надо обеспечить цепь для переменного входного сигнала с учетом того, чтобы максимальная часть его действовала на управляющий переход транзистора.

3. В каждом усилительном каскаде должна быть обеспечена цепь для переменного выходного сигнала с учетом того, что максимальная часть его должна действовать на вход следующего каскада.

4. Каждый каскад должен иметь хорошую температурную стабильность, т. е. изменения температуры не должны сильно влиять на его параметры.

5. Каждый предварительный каскад должен иметь возможно максимальный коэффициент усиления по напряжению.

6. Все предварительные каскады являются маломощными, т. е. они потребляют относительно мало тока, поэтому вопрос об увеличении их к. п. д. здесь вообще не возникает.

24 Схемы выходных каскадов

24.1. Общие сведения

Назначение выходных (оконечных) каскадов — усиливать мощность полезного сигнала для срабатывания громкоговорителя. Поэтому выходные каскады называются еще усилителями мощности.

Как уже известно, мощность является произведением напряжения и тока (см. формулу (4.5)). Следовательно, для получения значительной мощности необходимо, чтобы произведение тока и напряжения было большим. (Например, мощность $P=1$ Вт можно получить, если $U=2$ В и $I=0{,}5$ А, или если $U=10$ В и $I=0{,}1$ А и т. д). Поэтому выходные каскады, в отличие от предварительных, характеризуются тем, что в них сигналы относительно большие, т. е. напряжение и ток имеют значительные величины. Здесь обращаем Ваше внимание на тот факт, что речь идет о токе и напряжении не по постоянной составляющей, а по *переменному сигналу*, т. к. именно он является носителем информации.

Важной особенностью выходных каскадов является их экономичность, точнее их коэффициент полезного действия (к. п. д.). Например, если какой-то выходной каскад потребляет из источника тока мощность по постоянному току 1 Вт, а отдает в громкоговоритель переменную мощность 0,1 Вт, то, очевидно, его к. п. д. будет составлять только 10%. Это объясняется тем, что только 10% потребляемой мощности подается на нагрузку, а остальные 90% напрасно нагревают транзисторы, резисторы и пр.

Основные показатели любого оконечного каскада: выходная мощность по переменному току, отдаваемая на нагрузку (в маломощных выходных каскадах она равна десяткам милливатт, а в мощных — десяткам ватт); полоса частот (т. е. диапазон между самыми низкими и самыми высокими частотами, которые каскад может усиливать); коэффициент полезного действия (в различных схемах он обычно от 10% до 70%). Большой к. п. д. можно получить только в том случае, если выходной каскад согласован с нагрузкой. Рассмотрим это подробнее.

24.2. Электрическое согласование

В электротехнике часто используем понятие *генератор* (источник тока) и *нагрузка* (потребитель). Например, на рис. 24.1*а* батарейка представляет собой генератор постоянного тока, а лампочка является нагрузкой. Точно так же любой усилительный каскад можно рассматривать как генератор переменного тока, а следующий каскад как его нагрузку.

Когда данный генератор соединен с определенной нагрузкой, то основной вопрос, который при этом возникает, это вопрос их *согласования*. Очень часто молодые радиолюбители думают, что генератор и потребитель согласуются по напряжению (например, если батарейка 4,5 В, то и лампочка должна быть 4,5 В и т. д.). В действительности, вопрос согласования сводится к соотношению между внутренним (выходным) сопротивлением генератора и сопротивлением нагрузки. Чтобы объяснить это, рассмотрим один опыт, который можно проделать самостоятельно.

На рис. 24.1 к одной и той же батарейке сначала подключена автомобильная лампочка, потом лампочка для карманного фонарика и, наконец, — лампочка для освещения. На

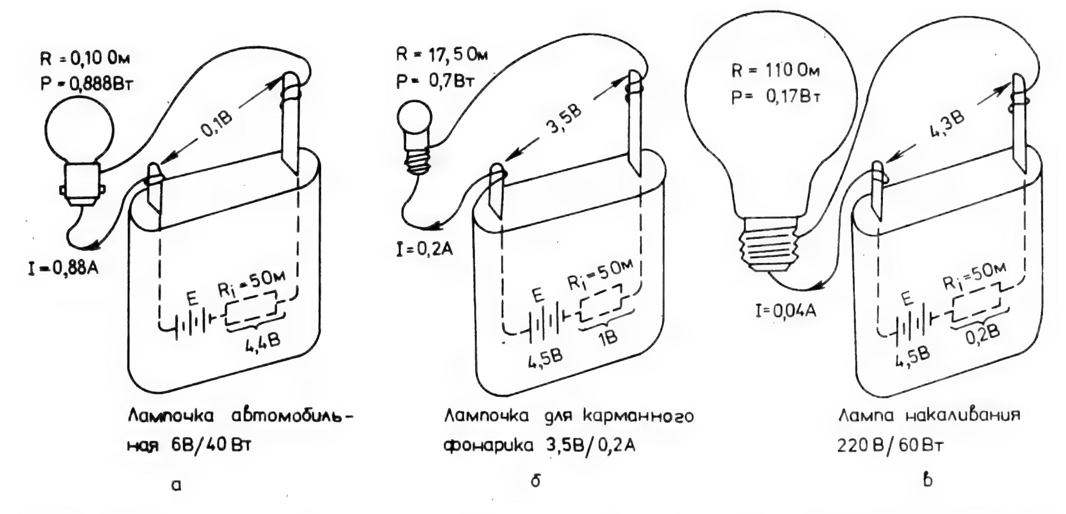


Рис. 24.1. *а*) Сопротивление нагрузки намного меньше внутреннего сопротивления источника; *б*) сопротивление нагрузки в 3—4 раза больше внутреннего сопротивления источника тока; *в*) сопротивление нагрузки намного больше внутреннего сопротивления источника

всех трех схемах нанесены токи и напряжения, *R* обозначено сопротивление лампочки в конкретном случае, *P* обозначена мощность, подаваемая на лампочку от батареи. Напомним, что сопротивление лампочки нелинейно, т. е. не является постоянной величиной, а зависит от протекающего тока. Этим опытом будет показано, что при соединении генератора с потребителем решающее значение имеет не только ЭДС генератора, но и сопротивление потребителя. Поэтому советуем читателю очень внимательно изучить зависимости, представленные на рис. 24.1, т. к. они лежат в основе всей схемотехники. Результаты этих опытов можно резюмировать следующим образом.

В первом опыте (рис. 24.1*а*) сопротивление потребителя намного меньше внутреннего сопротивления генератора, т. е. $R \ll R_i$. Поэтому напряжение на клеммах (выходное напряжение) значительно меньше самой ЭДС. Кроме того, ток в цепи относительно большой, а мощность, отдаваемая нагрузке, мала. Лампочка не светит, поскольку мощность, подаваемая на нее, едва достигает 0,088 Вт. Одновременно на внутрением сопротивлении R_i выделяется значительная мощность (3,9 Вт), которая напрасно нагревает саму батарею. Мощность, выделяемая на нагрузке, намного меньше мощности, выделяемой на внутреннем сопротивлении батареи, поэтому КПД системы около 2%.

Во втором опыте (рис. 24.1*б*) сопротивление потребителя того же порядка, что и внутреннее сопротивление генератора, т. е. $R \approx R_i$. Поэтому выходное напряжение немного меньше ЭДС батареи. Ток в цепи средней величины, а мощность на нагрузке значительная ($p = 0{,}7$ Вт), благодаря чему лампочка светит нормально. Мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении батареи, равна 0,2 Вт, т. е. она значительно меньше мощности на нагрузке, и при этом КПД около 30%.

В третьем опыте (рис. 24.1*в*) сопротивление потребителя значительно больше внутреннего сопротивления генератора, т.е. $R \gg R_i$. Поэтому напряжение на клеммах (выходное напряжение) почти равно ЭДС батареи. Ток в цепи очень мал. Мощность, выделяемая на нагрузке, тоже мала (0,17 Вт), поэтому лампочка не светит. Мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении батареи, очень мала

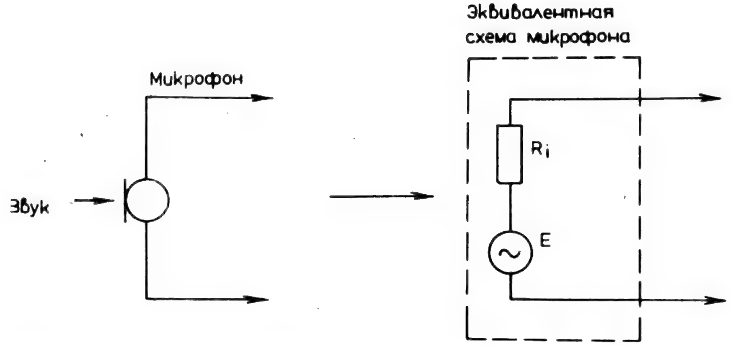


Рис. 24.2. Эквивалентная схема микрофона

(0,008 Вт), но поскольку и мощность нагрузки не большая, КПД системы мал (около 4,4%).

Из трех опытов становится ясно, что при различном соотношении между внутренним сопротивлением генератора и сопротивлением нагрузки, свойства цепи различные. Здесь действуют следующие закономерности.

1. Если основное требование состоит в том, чтобы данный генератор обеспечивал максимальный ток, то сопротивление нагрузки должно быть во много раз меньше внутреннего сопротивления генератора.

2. Если основное требование состоит в том, чтобы получить от данного генератора максимальную мощность, сопротивление нагрузки должно быть равным внутреннему сопротивлению генератора.

3. Если основное требование состоит в том, чтобы генератор обеспечивал максимальное напряжение на своем выходе, то сопротивление нагрузки должно быть во много раз больше внутреннего сопротивления генератора.

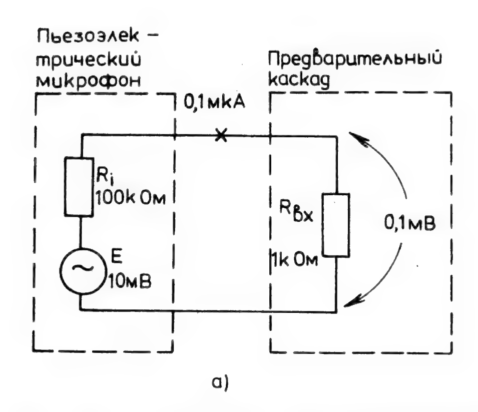
Следует отметить, что при конструировании данного усилительного каскада специалисты руководствуются не только одним „главным" требованием, а считаются со многими факторами. Следовательно, на практике прибегают к определенным компромиссам с учетом того, чтобы все устройство имело оптимальные качества.

24.3. Входное и выходное сопротивление усилительных каскадов

Электронные устройства обычно состоят из нескольких усилительных каскадов. Сигнал, который подается на усилитель, сначала усиливается первым каскадом, потом вторым и т. д., пока не дойдет до громкоговорителя. При таком положении каждый предыдущий каскад является генератором следующего, а каждый следующий — нагрузкой предыдущего.

Требования, предъявляемые к различным каскадам одного усилителя, не одинаковы. Так, например, главным требованием к предварительным каскадам является максимальная отдача напряжения генератора на нагрузку, в то время как к выходным каскадам главное требование — максимальная отдача мощности генератора на нагрузку. На практике эти различные требования осуществляются путем соответствующего подбора внутреннего сопротивления генератора и входного сопротивления нагрузки. (Обратите внимание, что речь идет о входном и выходном сопротивлении *по переменному току*, т. к. сигнал, подаваемый от одного каскада к другому, переменный).

Для того, чтобы показать, как важна роль входного и выходного сопротивления, рассмотрим один пример. Известно, что, когда на микрофон подается звук, на его выходе появляется переменное напряжение. Следовательно, микрофон можно представить



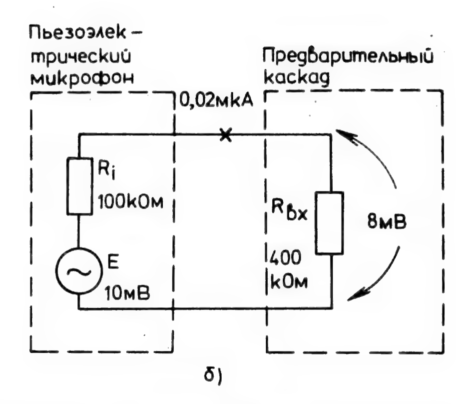


Рис. 24.3. *а)* **микрофон и усилительный каскад не согласованы;** *б)* **микрофон и усилительный каскад сравнительно хорошо согласованы**

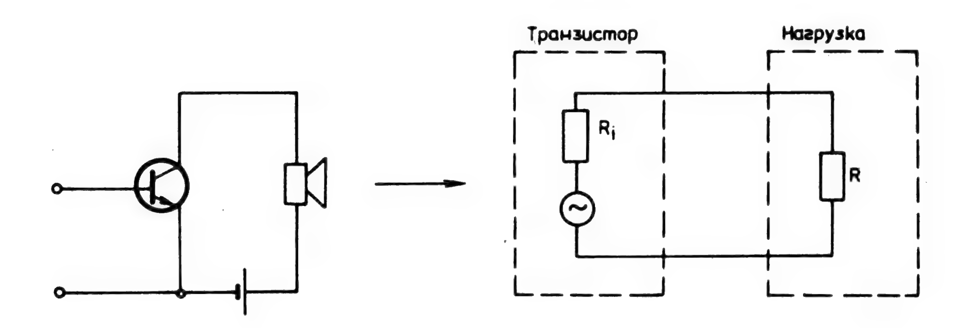
как генератор переменного тока с определенным внутренним сопротивлением. Это показано на рис. 24.2, где схема справа называется эквивалентной схемой микрофона.

После этих разъяснений можем рассмотреть конкретную схему с пьезоэлектрическим микрофоном. Из практики известно, что обычно он имеет такие данные: $E = 10$ мВ и $R_i = 100$ кОм. (Обратите внимание, что пьезоэлектрический микрофон высокоомный). Нас интересует, каково должно быть входное сопротивление первого усилительного каскада, чтобы получить максимальную отдачу напряжения из микрофона в каскад?

В п. 24.2 мы выяснили, что для того, чтобы получить большое переменное напряжение на выходе микрофона, предварительный каскад должен иметь большое входное сопротивление. И действительно, на рис. 24.3*а* видно, что если входное сопротивление предварительного каскада мало, то микрофон отдает этому каскаду малую часть своей ЭДС, но если предварительный каскад имеет большое входное сопротивление (рис. 24.3 *б*), то микрофон будет отдавать ему сравнительно большое напряжение. При сравнении обеих схем из рис. 24.3 видно, что во втором случае напряжение, подаваемое на каскад, в 80 раз больше, чем в первом!

Теперь рассмотрим еще один пример. На рис. 24.4*а* показан усилительный каскад мощности, где в коллекторную цепь транзистора включен

Рис. 24.4. Эквивалентная схема выходной цепи транзистора и нагрузки (только для переменной составляющей)



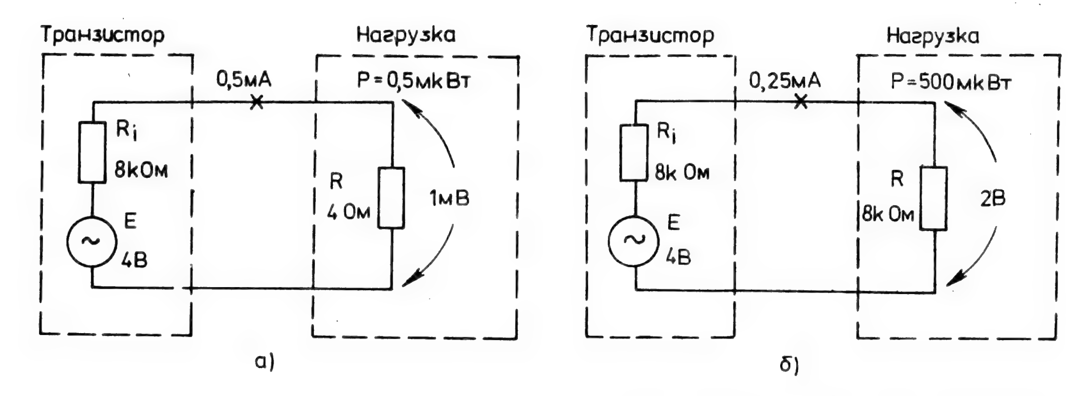


Рис. 24.5. *а*) выходная цепь транзистора не согласована с нагрузкой; *б*) выходная цепь согласована с нагрузкой

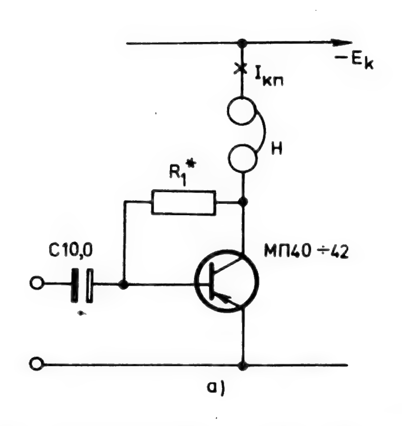
громкоговоритель. Когда на вход подается соответствующий сигнал, транзистор можно представить как генератор переменного тока с определенным внутренним сопротивлением, а громкоговоритель — как сопротивление его катушки. Это показано на рис. 24.4*б*, где схема справа называется эквивалентной схемой выходной цепи транзистора по переменному току. Обратите внимание, что схема действительна только для переменной составляющей, для которой батарея является коротким замыканием. Нас интересует, каково должно быть сопротивление громкоговорителя, чтобы транзистор отдавал ему максимальную мощность?

Как уже известно из п. 24.2, чтобы получить максимальную отдачу мощности, сопротивление громкоговорителя должно быть равным выходному (внутреннему) сопротивлению транзистора. Поскольку этот вопрос очень важен, остановимся на нем подробнее.

Сопротивление громкоговорителя. Это сопротивление катушки громкоговорителя по переменному току (см. рис. 13.3). Практика показывает, что если сделать катушку с большим сопротивлением, то вся колебательная система станет тяжелой и это ухудшит качества громкоговорителя. Именно поэтому современные громкоговорители (маломощные и мощные) имеют низкоомные катушки с сопротивлением $2 \div 8$ Ом.

Выходное сопротивление транзистора. Это выходное (внутреннее) сопротивление транзистора по переменному току. Оно зависит от схемы соединения (ОЭ, ОБ, ОК), от вида транзистора (маломощный, среднемощный мощный) и от его рабочей точки (т.е. от выбранного коллекторного тока покоя). Например, маломощный транзистор П13А при коллекторном токе покоя 1 мА имеет $R_i = 30$ кОм, а при коллекторном токе 5 мА равняется 8 кОм. Мощный транзистор П210 при коллекторном токе покоя 10 мА имеет $R_i = 1500$ Ом, а при коллекторном токе 50 мА — 400 Ом.

Из вышесказанного становится ясно, что выходное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ значительно больше сопротивления громкоговорителей. Поэтому, если в коллекторную цепь транзистора непосредственно включить громкоговоритель (рис. 24.4), то мощность, отдаваемая ему, будет ничтожно мала. Например, если транзистор маломощный и громкоговоритель имеет сопротивление $R = 4$ Ом, будем иметь случай, показанный на рис. 24.5*а*. Здесь следует обратить внимание, что мощность, отдаваемая громкоговорителю, равна едва 0,5 мкВт. Если, однако, этому же транзистору обеспечить нагрузку 8 кОм (рис. 24.5*б*), то мощность, отдаваемая громкоговорителю, будет равна 500 мкВт, т. е. в 1000 раз больше! Этот пример еще раз подтверждает, что для



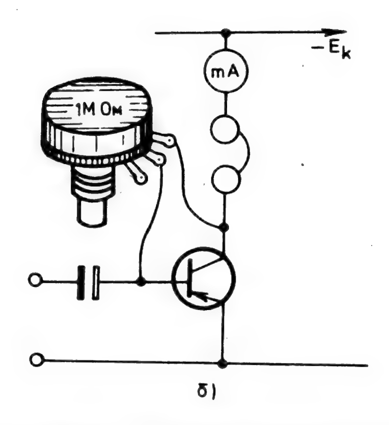


Рис. 24.6. *а*) базовый резистор отмечен звездочкой, что означает, что нужно подобрать его опытным путем; *б*) простой способ определения значения базового резистора

максимальной отдачи мощности необходимо, чтобы нагрузочное сопротивление было равным выходному сопротивлению транзистора. Именно по этой причине громкоговорители подключают к выходным каскадам не непосредственно, а через выходной трансформатор.

24.4. Однотактный выходной каскад

Главной особенностью однотактных выходных каскадов является малый к. п. д. Поэтому их используют только при малых мощностях, например, до 20 мВт.

Напряжение питания E_K,В	Сопротивление наушников R, Ом	Необходимый коллекторный ток покоя I_{Kn}, мА
4,5	50—100	10
	200—500	5
	1000—4000	0,5
6	50—100	8
	200—500	4
	1000—4000	1
9	50—100	6
	200—500	3
	1000—4000	1

На рис. 24.6*а* показана схема однотактного выходного каскада с наушниками. Он может быть использован в небольших радиолюбительских приемниках. Здесь сопротивление R_1 в цепи базы обозначено звездочкой. Это показывает, что точное его значение подбирается во время работы. Это сопротивление определяет величину коллекторного тока покоя I_{Kn} транзистора. Со своей стороны, необходимый коллекторный ток покоя зависит от напряжения батареи питания и сопротивления наушников. Именно эти зависимости показаны в таблице. Например, из таблицы видно, что при питании напряжением 6 В и использовании наушников с сопротивлением 4000 Ом необходимый коллекторный ток покоя равен $I_{Kn} = 1$ мА. Практически это можно получить, если на место базового сопротивления включить потенциометр, а на место, обозначенное крестиком, включить миллиамперметр (рис. 24.6*б*). Настраивая потенциометр, устанавливаем необходимую величину коллекторного тока. После этого измеряем омметром сопротивление потенциометра и заменяем его соответствующим резистором. С помощью этой схемы (рис. 24.6*а*) можно получить выходную мощность 0,1 ÷ 10 мВт, причем в ней с успехом может быть использован любой маломощный низкочастотный транзистор.

На рис. 24.7*а* показана простая схема маломощного выходного каскада с небольшим громкоговорителем. Здесь включение громкоговорителя не является непосредственным, а осуществляется через выходной трансформатор, чем обеспечивается хорошее согласование между значительным выходным сопротивлением транзистора и небольшим сопротивлением громкоговорителя. В результате этого выходная мощность каскада равна 5÷20 мВт. При изготовлении трансформатора можно использовать трансформатор от старого транзисторного приемника, только намотать его заново. Данные для выходного трансформатора следующие: сечение магнитопровода (сердечника) — 0,16÷0,30 см ^{2}, первичная обмотка — 800 витков /0,07 мм; вторичная обмотка — 50 витков/ 0,17 мм. Точная величина базового сопротивления подбирается опытным путем уже известным способом с учетом того, что коллекторный ток покоя должен быть 6 мА. Надо еще добавить, что и здесь с успехом можно использовать любой маломощный низкочастотный транзистор.

На рис.24.7*б* показана более совершенная схема однотактного выходного каскада с небольшим громкоговорителем. Здесь использован тот же самый трансформатор и получается та же самая выходная мощность, но стабильность и качество лучше. Сопротивление резистора R_1 подбирается опытным путем известным уже способом с учетом того, чтобы коллекторный ток был 6 мА. В этом выходном каскаде тоже можно использовать любой маломощный низкочастотный транзистор.

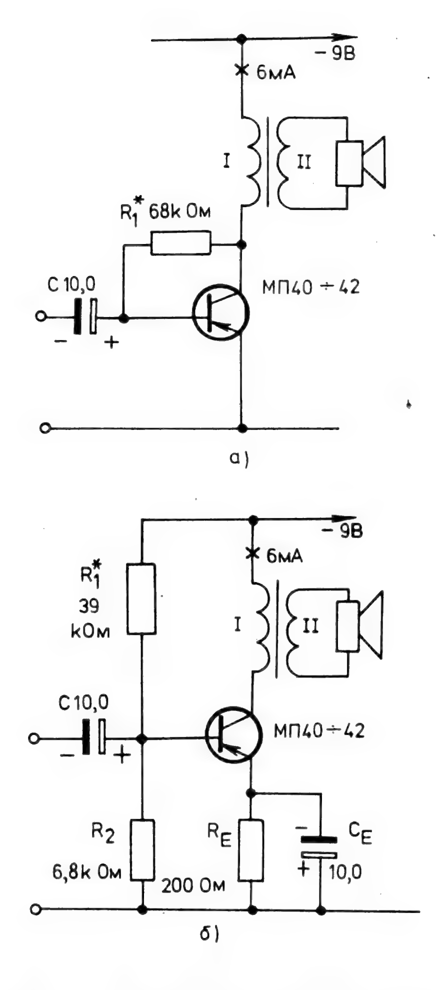


Рис. 24.7. *а*) однотактный выходной каскад с выходным трансформатором; *б*) однотактный выходной каскад с выходным трансформатором и последовательной отрицательной обратной связью по постоянному току

Как уже упоминалось, основной недостаток однотактных выходных каскадов — небольшой к. п. д.: примерно 5÷20%. И в то время как при малых мощностях это не так уж важно, при больших мощностях к.п.д. имеет второстепенное значение. Например, если у какого-нибудь промышленного транзисторного радиоприемника выходной каскад однотактный, то его батареи очень быстро садятся и их надо часто менять. Это объясняется тем, что только небольшая часть энергии бата-

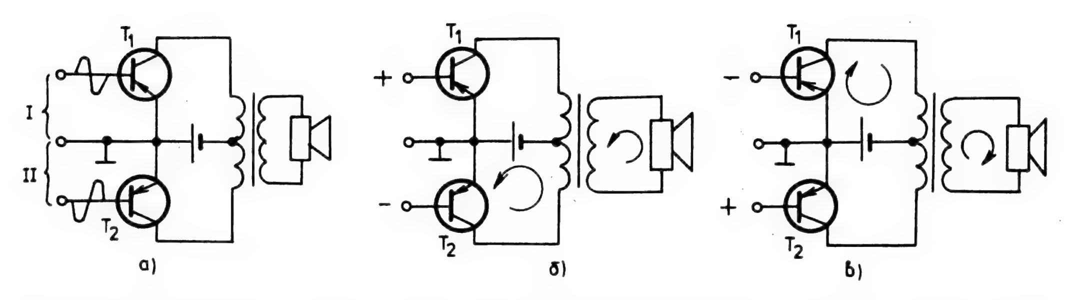


Рис. 24.8. *а*) двухтактный выходной каскад имеет два входа, на которые подаются противофазные сигналы; *б*) в один из полупериодов открывается транзистор T_2; и *в*) в следующий полупериод открывается транзистор T_1

реи превращается в звук, а остальная часть бесполезно нагревает транзисторы, резисторы и пр. Именно поэтому выходные каскады почти всех низкочастотных усилительных устройств выполняют по двухтактной схеме.

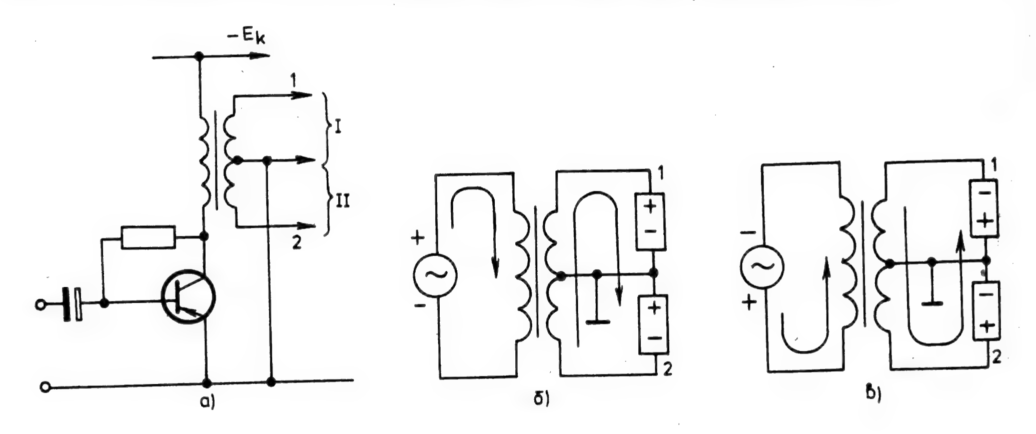
24.5. Двухтактный трансформаторный выходной каскад

Особенность двухтактных выходных каскадов в том, что они имеют сравнительно большой к. п. д., который на практике достигает 60÷70%. Одновременно с этим их схема сложнее, поскольку она содержит два транзистора.

Как видно из рис. 24.8*а*, один такой каскад имеет два входа (относительно шасси), на которые подают противофазные переменные напряжения. Это означает, что когда переменное напряжение на одной базе положительно, напряжение на другой базе должно быть отрицательно и обратно. Как мы увидим далее, эти два противофазных напряжения вырабатываются т. н. фазоинверсным каскадом. Он имеет два выхода (относительно шасси) и всегда находится перед двухтактным выходным каскадом. Обратите внимание, что выходной трансформатор двухтактных каскадов имеет среднюю точку в первичной обмотке (рис. 24.8*а*).

Для того, чтобы разобраться в работе двухтактного выходного каскада, на рис. 24.8*б* показан момент, когда на первый вход действует положительное напряжение (относительно шасси), а на второй — отрицательное. В этом поло-

Рис. 24.9. *а*) фазоинверсный каскад с трансформатором; *б*) в один полупериод точка *1* положительна относительно шасси; *в*) в другой полупериод точка *1* отрицательна относительно шасси



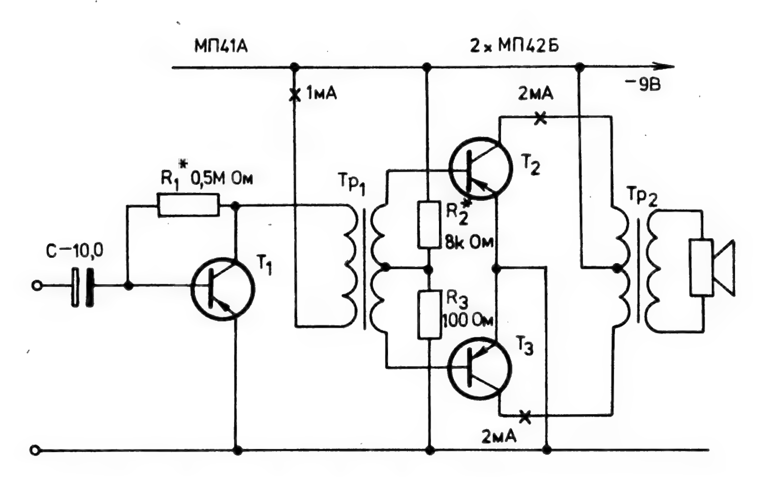


Рис. 24.10. Схема маломощного выходного каскада вместе с фазоинверсным каскадом

жении верхний транзистор заперт, а нижний открывается, т. е. только через нижнее плечо протекает ток. В том случае, когда на первый вход действует отрицательное напряжение, а на второй вход — положительное (рис. 24.8*в*), нижний транзистор заперт, а верхний открыт, т. е. ток протекает только через верхнее плечо. Или, короче говоря, когда один транзистор открыт, другой заперт и обратно. Следовательно, одна полуволна переменного тока в трансформаторе формируется одним транзистором, а другая полуволна — другим. Важная особенность схемы заключается в том, что при отсутствии входных сигналов коллекторные токи покоя обоих транзисторов относительно малы. Следовательно, во время пауз потребление двухтактного каскада небольшое и это одна из причин его экономичности. Второй причиной хорошей экономичности можно назвать тот факт, что один транзистор работает, а другой заперт, т. е. не потребляет энергию.

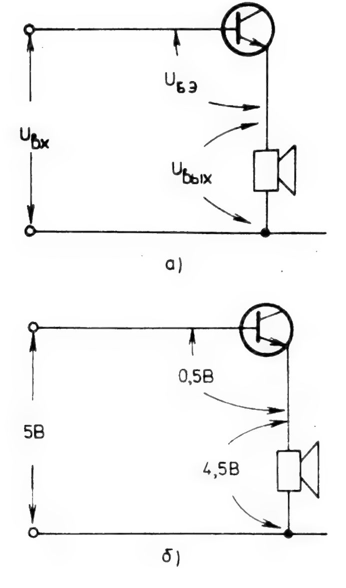
Теперь рассмотрим одну из наиболее распространенных схем фазоинверсного каскада, показанную на рис. 24.9*а*. Особенность здесь состоит в том, что в коллекторную цепь транзистора включен фазоинверсный трансформатор. Его вторичная обмотка имеет средний вывод и он соединен с шасси. Таким образом, фазоинверсный трансформатор имеет два выхода, переменные напряжения на которых всегда находятся в противофазе. Это видно на рис. 24.9*б*, где во время положительного полупериода генератора точка *1* положительна относительно шасси, а точка *2* — отрицательна. Во время отрицательного полупериода генератора точка *1* отрицательна относительно шасси, а точка *2* — положительна.

На рис. 24.10 показана конкретная схема двухтактного выходного каскада вместе с фазоинверсным каскадом. Фазоинверсный трансформатор T_{p1} и выходной трансформатор T_{p2} можно купить в магазине радиоматериалов. Можно их позаимствовать и из старых транзисторных радиоприемников. Данные фазоинверсного трансформатора следующие: сечение сердечника — $0{,}16 \div 0{,}36$ см^2; первичная обмотка — 1200 витков /0,07 мм; вторичная обмотка — 240 витков/ 0,10 мм с выводом в середине. Выходной трансформатор имеет следующие данные: сечение сердечника — 0,25—0,36 см^2, первичная обмотка — 600 витков /0,12 мм с выводом в середине; вторичная обмотка — 50 витков/0,20 мм. Оба выходных транзистора должны быть одинаковыми и иметь почти одинаковый коэффициент усиления β. Значение резистора R_1 подбирается опытно с учетом коллекторного тока покоя

транзистора T_1, который должен быть 1 мА. То же самое относится и к точному значению резистора R_2 с учетом того, что коллекторные токи покоя транзисторов T_2 и T_3 должны быть 2 мА. Громкоговоритель небольшой и имеет сопротивление катушки 4 Ом. При соответствующем сигнале на входе выходная мощность этого усилителя равна 0,1 Вт.

При рассмотрении этой схемы может возникнуть вопрос, почему средний вывод вторичной обмотки фазоинверсного трансформатора не соединен с шасси непосредственно, а через резистор R_3? Как видно из рис. 24.10, величина R_3 небольшая — 100 Ом. Поэтому падение напряжения на нем очень мало (около 0,1 В), т. е. можно считать, что средняя точка трансформатора действительно соединена с шасси. Одновременно с этим падение напряжения около 0,1 В является небольшим напряжением смещения для

Рис. 24.11. *а*) в схеме с ОК входное переменное напряжение распределяется между управляющим переходом и между нагрузкой; *б*) переменное напряжение на управляющем переходе намного меньше, чем на нагрузке



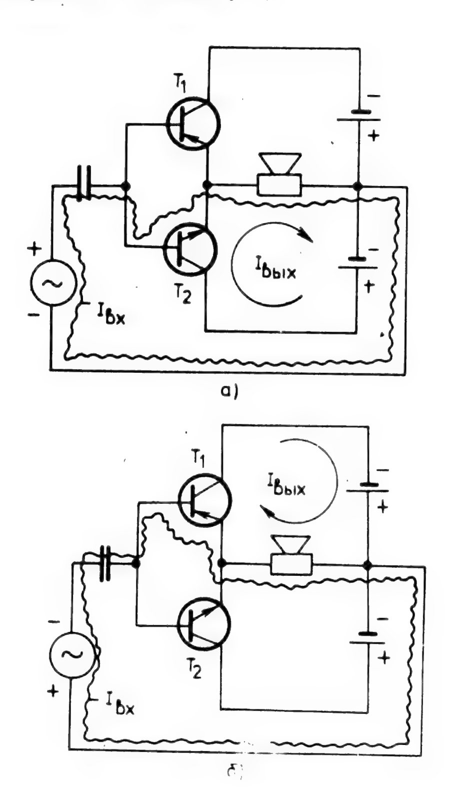
обоих транзисторов, посредством которого нелинейные искажения каскада уменьшаются до минимума.

24.6. Двухтактный бестрансформаторный каскад

Трансформаторы — объемные и сравнительно дорогие детали, и их устранение значительно уменьшает стоимость и вес выходных каскадов. Именно поэтому большинство современных выходных каскадов — бестрансформаторные.

При устранении выходного трансформатора сразу возникает вопрос, как же осуществлять согласование между небольшим сопротивлением громкоговорителя (4÷8 Ом) и сравни-

Рис. 24.12. *а*) в один полупериод открывается только транзистор T_2; *б*) в другой полупериод открывается транзистор T_1



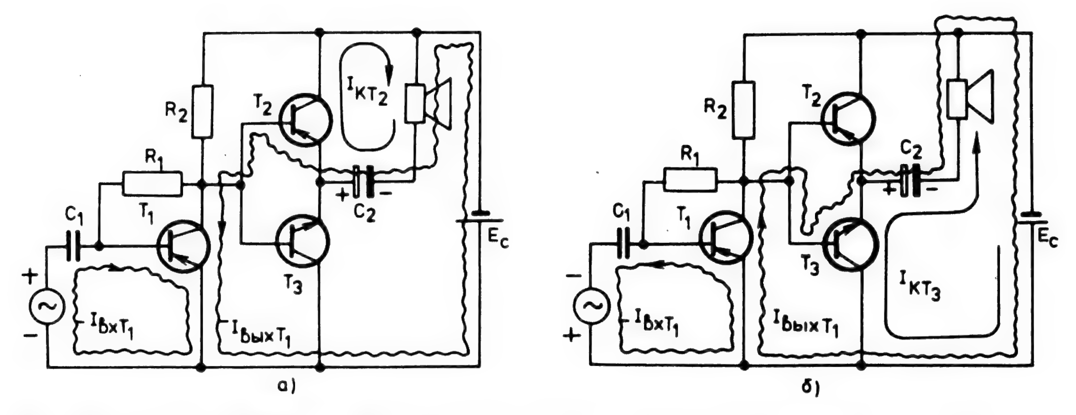
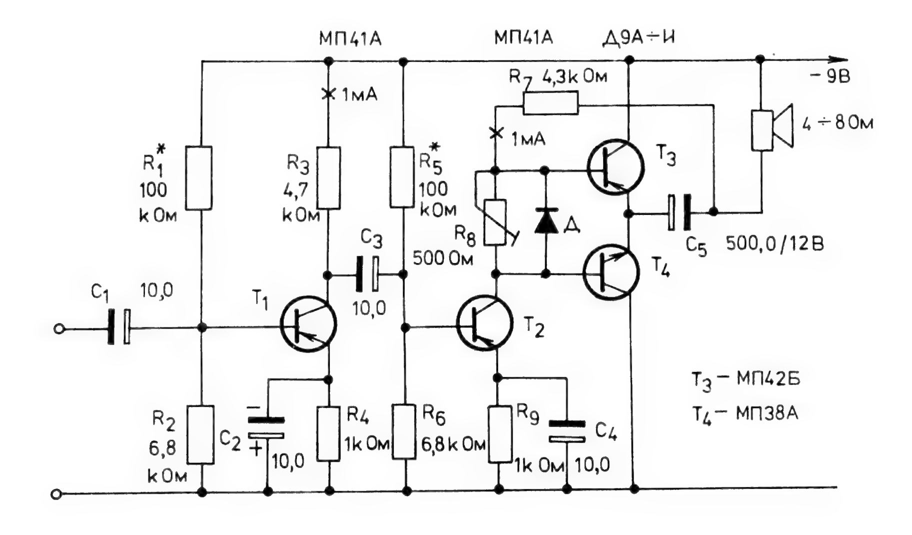


Рис. 24.13. *а)* один полупериод работает только транзистор T_2; *б)* другой полупериод работает транзистор T_3

тельно большим ($1 \div 10$ кОм) выходным сопротивлением транзисторов? Этого добиваются, соединяя выходные транзисторы по схеме с ОК (эмиттерный повторитель); в этом случае их выходное сопротивление очень мало, примерно $10 \div 100$ Ом. Здесь сразу следует напомнить об основном „недостатке" схемы с ОК, а именно, что она не усиливает по напряжению: т. е. каково входное переменное напряжение, почти таково и переменное напряжение на выходе (на нагрузке). И поскольку для получения значительной мощности выходное напряжение должно быть тоже значительным, это значит, что в схеме с ОК входное переменное напряжение (в отличие от схемы с ОЭ) должно быть относительно большим — примерно 1—10 В. Эта особенность важна и ее надо запомнить. Она не противоречит сказанному выше, что даже и в мощных транзисторах переменное напряжение между базой и эмиттером не может быть больше $0{,}5 \div 0{,}8$ В. В схеме с ОК входной сигнал действует на управляющем участке, проходя через нагрузку, т. е. входной сигнал распределяется между участком усиления и нагрузкой (рис. 24.11*а*). Например, если переменный входной сигнал равен 5 В, из них 4,5 В

Рис. 24.14. Схема бестрансформаторного низкочастотного усилителя



действуют на нагрузку и 0,5 В действуют на управляющий участок (рис. 24.11*б*). Сейчас уже ясно, что для запуска бестрансформаторных выходных каскадов нужны значительные переменные входные напряжения, т. е. перед ними должны быть хотя бы один — два предварительных каскада.

Теперь остановимся на вопросе об устранении фазоинверсного трансформатора, основная задача которого состоит в обеспечении двух противофазных напряжений. Этот трансформатор может быть устранен, если выбрать выходные транзисторы с противоположной проводимостью, т. е. один должен быть типа *n-p-n*, а другой — типа *p-n-p*, в то время как их остальные параметры (мощность, коэффициент усиления β и пр.) должны быть одинаковыми. Подобранные таким образом два транзистора называются *комплементарной парой* или транзисторами с *дополнительной симметрией*. Важнейшая особенность такого выходного каскада состоит в том, что он **управляется** не двумя сигналами в противофазе, а только одним сигналом, т. е. он имеет только один вход. Это показано на рис. 24. 12, где при положительном входном сигнале (входной переменный ток показан волнистой линией) открывается только нижний транзистор, т. е. переменный коллекторный ток протекает только через нижнее плечо схемы. При отрицательном входном сигнале отпирается только верхний транзистор, т. е. переменный коллекторный ток протекает только через верхнее плечо схемы. Таким образом в один полупериод ток через нагрузку протекает в одном направлении, а в следующий полупериод — в другом. Недостаток этой схемы в том, что она питается от двух источников тока и, кроме того, базы транзисторов плавающие.

Этих недостатков можно избежать в схеме, данной на рис. 23. 13, где, кроме оконечного, показан и предварительный каскад. Здесь волнистой линией обозначен входной и выходной переменный ток транзистора T_1 в первый и второй полупериод. Обратите внимание, что выходной переменный ток транзистора T_1 в первый полупериод открывает транзистор T_2 и в его коллекторной цепи протекает переменный ток, вызываемый заряженным конденсатором C_2. При отсутствии сигнала конденсатор C_2 заряжен до напряжения, равного половине напряжения источника тока. Во втором полупериоде переменный ток транзистора T_1 открывает транзистор T_3 и в его коллекторной цепи протекает переменный ток, вызванный разностью напряжений источника тока и конденсатора C_2.

На рис. 24.14 показана конкретная схема **НЧ** усилителя с бестрансформаторным выходным каскадом с выходной мощностью 0,1 Вт. Значения резисторов R_1 и R_5 подбираются опытным путем с учетом того, чтобы коллекторные токи транзисторов T_1 и T_2 были равны 1 мА. Посредством триммер-потенциометра R_8 добиваемся наиболее чистого звука в усилителе, т. е. минимальных нелинейных искажений. Диод *Д* служит для температурной стабилизации выходных транзисторов. Кроме указанных выходных транзисторов, с успехом могут быть использованы следующие пары: ГТ402Б и ГТ404Б, МП38 и МП42 и т. д.

ЗАПОМНИТЕ!

1. **Электронные устройства обычно состоят из нескольких усилительных каскадов. Сигнал, подаваемый к усилителю, прежде всего усиливается первым каскадом, потом вторым и т. д., пока не дойдет до громкоговорителя.**

2. Основной параметр любого усилительного каскада — его входное и выходное сопротивление по переменному току, поскольку сигнал, который подается от одного каскада к другому, переменный.

3. Важнейший вопрос при соединении отдельных усилительных каскадов — их согласование, т. е. выбор соответствующего соотношения между выходным сопротивлением предыдущего каскада и входным сопротивлением следующего каскада.

4. Предназначение выходных каскадов — усиливать мощность полезных сигналов для запуска громкоговорителя, поэтому здесь токи и напряжения имеют большие значения.

5. Ввиду значительной мощности выходных каскадов основным требованием к ним является экономичность, т. е. возможно больший к. п. д. И поскольку двухтактная схема имеет наибольший к. п. д., выходные каскады большинства современных радиоэлектронных устройств выполнены по двухтактной схеме.

---

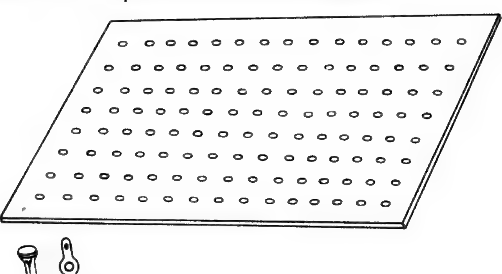
25 Лаборатория радиолюбителя

25.1. Общие сведения

Радиоэлектроника — наука прикладная, и ее изучение немыслимо без практических занятий. Существует мнение, что прежде чем начать собирать простые конструкции, следует предварительно ознакомиться с рядом основных теоретических положений электротехники, полупроводников и т. д. Другие считают, что молодой радиолюбитель может начать свою деятельность с конструирования простых устройств без ознакомления с элементарной теорией. С нашей точки зрения оба мнения слишком категоричны. Опыт показывает, что хорошие результаты получаются тогда, когда теория и практика идут вместе. Поэтому мы рекомендуем начинающим радиолюбителям одновременно с изучением элементарной теории приступить к ознакомлению с различными радиодеталями и материалами и с конструированием простых электронных устройств. С этой целью радиолюбитель должен начать организацию своей „лаборатории". Здесь имеется в виду не какое-то самостоятельное помещение, а угол комнаты, в котором можно поставить стол или еще лучше какой-нибудь старый письменный стол с ящиками для инструментов и материалов.

Перечислим и самые необходимые инструменты: комбинированный измерительный прибор (ампер-вольт-омметр), индукционный (или обычный) паяльник, плоскогубцы, кусачки, отвертки — маленькая и средняя, молоточек, пинцет, перочинный ножик, ножовка, небольшая ручная дрель, шило, сверла различного диаметра, треугольник, ножницы для резки железа и пр. А наиболее необходимые материалы следующие: припой, канифоль, медный провод ПЭЛ различного диаметра, неизолированный монтажный провод, гетинаксовые платки различных размеров, изоляционные трубочки (кембрик) различного диаметра, разные конденсаторы, резисторы, потенциометры, транзисторы, диоды, старые трансформаторы и т. д.

Рис. 25.1. Пробное шасси для макетов





При сборке электронных устройств рекомендуется использовать пробное шасси, на котором выполняется первоначальный монтаж, при этом концы резисторов, диодов, транзисторов, конденсаторов и т. д. не подрезаются. Такое пробное шасси показано на рис. 25.1. Оно представляет собой гетинаксовую платку размерами примерно 250 × 150 × 3 мм, на которой в шахматном порядке пробиты отверстия на расстоянии 15 мм один от другого, в которых закреплены монтажные ушки.

На платке можно просверлить и другие отверстия для закрепления ферритной антенны, потенциометров и пр.

25.2. Батареи и аккумуляторы

Питание различных радиоэлектронных устройств осуществляется от батарей, аккумуляторов и выпрямителей.

Батареи — это гальванические элементы, в которых химическая энергия превращается в электрическую. Они ис-

пользуются однократно и после того, как „сядут“, их заменяют новыми. На рис. 25.2 показаны наиболее часто употребляемые батареи вместе с их обозначением.

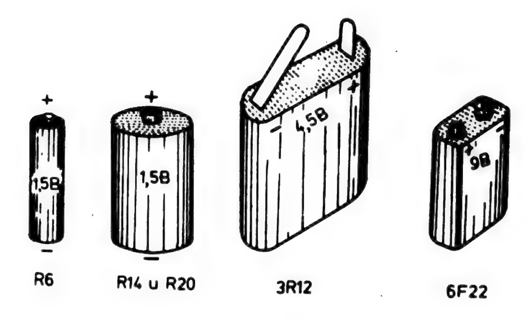


Рис. 25.2. Различные виды батарей

При отсутствии потребления (на „холостом ходу“) напряжение на клеммах (полюсах) любой батареи равно ее ЭДС. При наличии потребления напряжение на клеммах меньше ЭДС, т. к. имеется падение напряжения на внутреннем сопротивлении (рис. 25.3*а*).

Эта особенность очень важна для любого источника тока и выражается его нагрузочной характеристикой. На рис. 25.3*б* показаны характеристики идеального источника тока, аккумулятора и плоской батареи. Видно, что чем больше внутреннее сопротивление, тем быстрее уменьшается напряжение на клеммах при увеличении потребления. Следует отметить, что внутреннее сопротивление новых батарей равно $1 \div 10$ Ом, а после употребления $100 \div 500$ Ом.

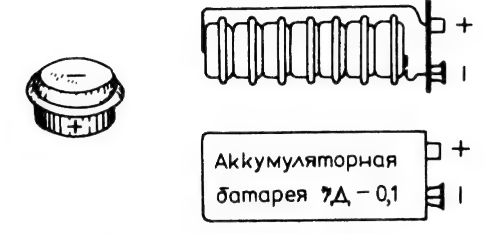


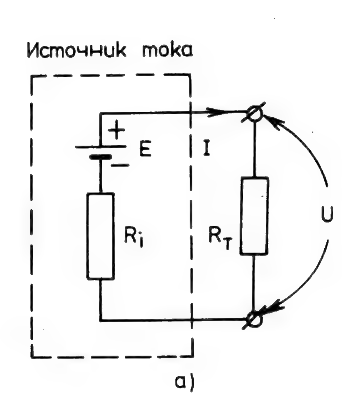
Рис. 25.4. Миниатюрные аккумуляторы

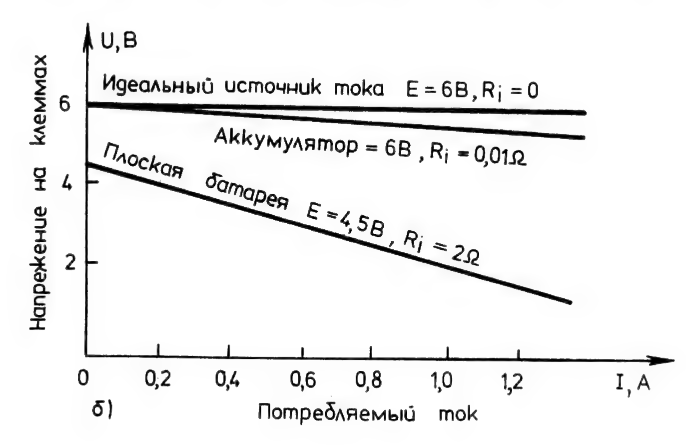
Аккумуляторы являются вторичными источниками электрической энергии, т. е. их надо зарядить, прежде чем использовать. На рис. 25.4 показан дисковый аккумулятор типа НКГ (никель-кадмиевый-герметический), а рядом показана аккумуляторная батарея, которая состоит из 7 последовательно соединенных дисковых аккумуляторов.

В заряженном состоянии дисковые аккумуляторы типа НКГ имеют напряжение 1,5 В, и по мере разряжения оно не должно падать ниже 1,1 В. Например, в заряженном состоянии аккумуляторная батарея 7Д—0,1 имеет напряжение 8,75 В, а в разряженном — 7 В.

Зарядка аккумуляторов производится при помощи соответствующих выпрямителей, а зарядный ток и время

Рис. 25.3. *а*) эквивалентная схема источника тока; *б*) нагрузочные характеристики различных источников тока





зарядки указывается заводом-изготовителем.

25.3. Сетевые трансформаторы

Сетевые трансформаторы являются составной частью почти каждого электронного устройства, питающегося от электросети. Радиолюбители обычно не покупают готовых трансформаторов, а наматывают их сами, используя подходящий магнитопровод. Чаще всего используют Ш-образный магнитопровод, при этом на его среднее плечо наматывают друг на друга (или рядом друг с другом) первичную и вторичную обмотки (рис. 25.5*а*). Пластины этого магнитопровода стандартизованы, а толщина пакета выбирается конструктором. Основной величиной здесь является сечение магнитопровода $Q_ж$ (рис. 25.5*б*), для которого можем записать $Q_ж = ac$. Другая величина — площадь окна, равная $S_{ок} = bh$.

При расчете трансформаторов предварительно заданными величинами (т. е. известными) являются напряжение сети $U_1 = 220$ В, номинальное напряжение U_2 вторичной обмотки, номинальный ток I_2 через нагрузку, номинальная вторичная мощность $P_2 = U_2I_2$. (Если трансформатор содержит две и более вторичных обмоток, номинальная вторичная мощность его равна $P_2 = U_2I_2 + U_3I_3 + \ldots$.).

Для быстрого расчета маломощных сетевых трансформаторов с Ш-образным магнитопроводом можно использовать табл. 25.1. В ней даны вторичная мощность P_2, сечение магнитопровода $Q_ж$, количество витков w_1 в первичной обмотке при $K_1 = 220$ В, диаметр d_1 провода первичной обмотки, число витков на один вольт $w_{1В}$.

На примере рассмотрим, как надо использовать таблицу.

Пример 25.1. Рассчитать сетевой трансформатор с данными:

$U_1 = 220$ В, $U_2 = 9$ В, $I_2 = 0{,}2$ А.

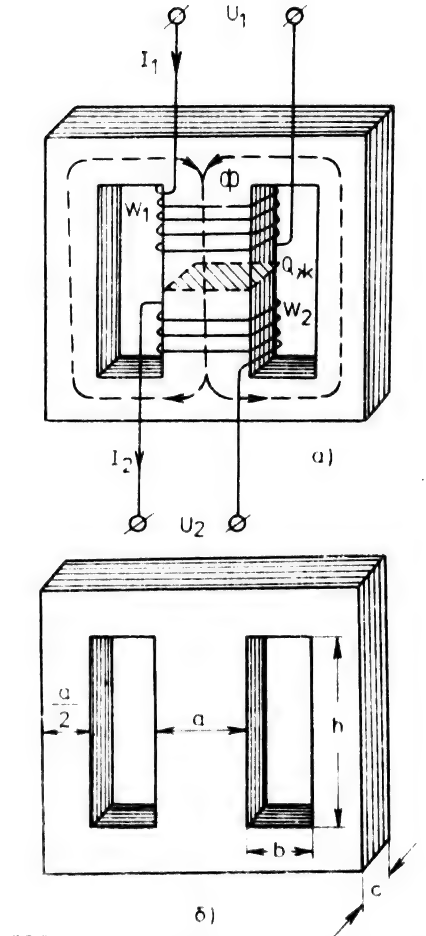


Рис. 25.5. *а*) устройство трансформаторов; *б*) размеры железного ядра

Определяем вторичную мощность $P_2 = U_2I_2 = 9 \cdot 0{,}2 = 1{,}8$ Вт. Округляем мощность вторичной обмотки $P_2 = 2$ Вт. Из табл. 25.1 находим следующие величины: $Q_ж = 2{,}1$ см^2, $w_1 = 4650$ витков, $d_1 = 0{,}08$ мм, число витков на один вольт $w_{1В} = 21$. Число витков во вторичной обмотке находим по формуле $w_2 = 1{,}1\ U_2w_{1В} = 1{,}1 \cdot 9 \cdot 21 = 210$ витков.

Для определения диаметра провода во вторичной обмотке используем формулу

$d_2 = 0{,}025 \cdot \sqrt{I_2} = 0{,}025\sqrt{200} = 0{,}35$ мм,

где ток I_2 подставляем в мА.

При сборке любительских сетевых трансформаторов надо измерить диа-

Таблица 25.1

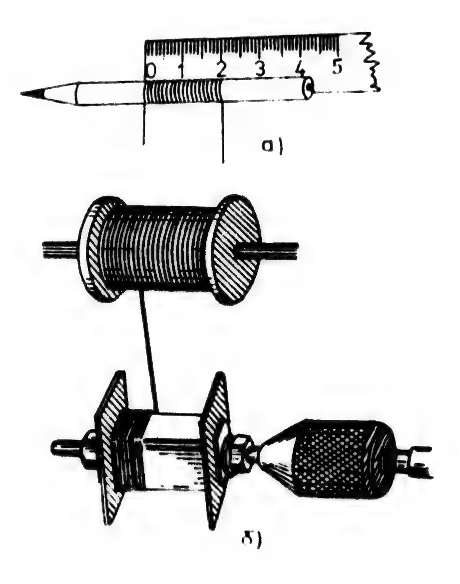
Мощность во вторичной обмотке P_2, Вт	Сечение магнитопровода $Q_ж$, см²	Число витков первичной обмотки w_1	Диаметр провода первичной обмотки d_1, мм	Число витков на один вольт $w_{1В}$	Мощность во вторичной обмотке P_2, Вт	Сечение магнитопровода $Q_ж$, см²	Число витков первичной обмотки w_1	Диаметр провода первичной обмотки d_1, мм	Число витков на один вольт $w_{1В}$
1	2	3	3	5	1	2	3	3	5
0,5	1,0	9900	0,05	45	32	7,5	1320	0,35	6,0
1	1,4	7100	0,06	32	36	7,9	1250	0,37	5,7
2	2,1	4650	0,08	21	40	8,3	1190	0,40	5,4
4	3,0	3300	0,12	15	46	8,9	1120	0,42	5,1
6	3,7	2650	0,15	12	52	9,2	1080	0,45	4,9
8	4,2	2360	0,17	10,7	60	9,8	1000	0,48	4,6
10	4,6	2180	0,19	9,8	70	10,3	950	0,52	4,3
12	5,0	1980	021	9,0	80	11,0	900	0,55	4,1
14	5,3	1870	0,23	8,5	90	11,7	860	0,59	3,9
16	5,6	1760	0,25	8,0	100	12,3	815	0,62	3,7
18	5,9	1670	0,27	7,6	120	13,4	750	0,68	3,4
20	6,2	1600	0,28	7,3	140	14,5	680	0,73	3,1
					160	15,5	640	0,78	2,9
24	6,6	1500	0,29	6,8	180	16,5	600	0,80	2,7
28	7,1	1400	0,32	6,4	200	17,3	570	0,86	2,6

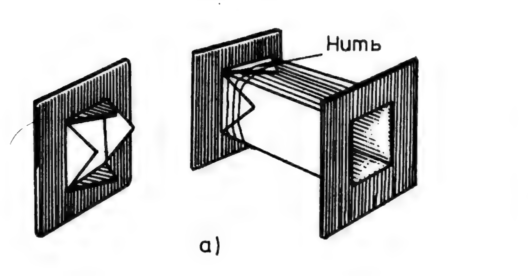
метр медного эмалированного провода. При отсутствии микрометра измеряем следующим образом. На обычный карандаш наматываем плотно друг к другу витки провода так, чтобы их общая длина была 20 мм (рис. 25.6*а*). После этого отматываем и считаем, сколько витков было намотано. Допустим, их было 57. Тогда делим 20:57 = 0,35. Следовательно, диаметр провода с изоляцией равен 0,35 мм.

Таблица 25.2

Диаметр изолированного провода мм	Коррекция мм
От 0,05	0,01
0,10	0,01
0,20	0,02
0,26	0,02
0,30	0,03
0,40	0,03
0,50	0,04
0,70	0,05
1,00	0,06
до 0,09	
0,19	
0,25	
0,29	
0,39	
0,49	
0,70	
1,00	
2,00	

Рис. 25.6. *а*) простой способ измерения диаметра проводника; *б*) для намотки обмоток можно использовать дрель





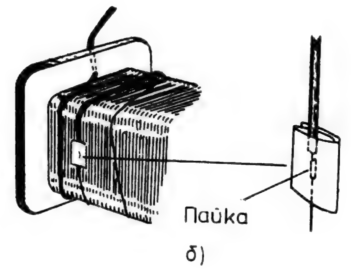


Рис. 25.7. *а*) так делается катушка; *б*) закрепление вывода

Для определения диаметра без изоляции необходима коррекция согласно табл. 25.2. В нашем случае коррекция 0,03. Таким образом, диаметр без изоляции получается $0{,}35-0{,}03=0{,}32$ мм.

Если данная обмотка (например вторичная) содержит небольшое число витков, ее можно намотать „от руки". Однако, если обмотка содержит больше витков (например, первичная), ее можно намотать при помощи ручной дрели, в патроне которой закрепляется подходящий винт с двумя гайками (рис. 25.6*б*).

На рис. 25.7*а* показано, как можно сделать самодельный каркас для трансформатора. Он делается из крепкого картона толщиной примерно $1{,}5\div2$ мм с помощью ножниц или перочинного ножа. Отдельные части каркаса склеиваются подходящим клеем, а сверху обматываются ниткой.

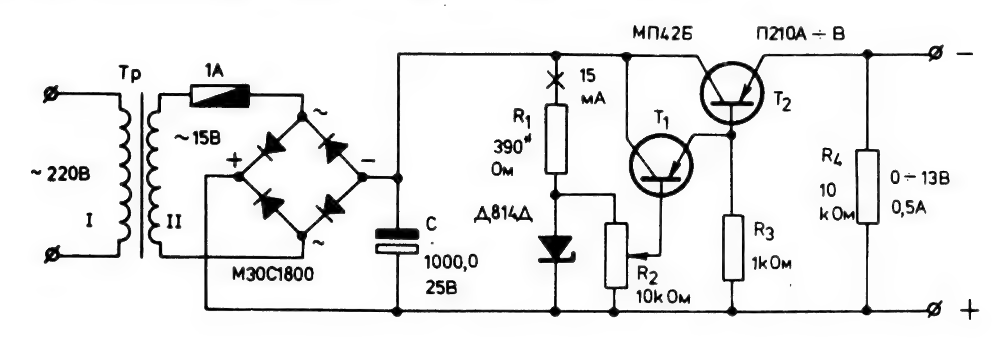
Выводы обмотки, намотанной тонким проводом, делают из более толстого провода (рис. 25.7*б*), который после пайки изолируется согнутым кусочком ватмана.

25.4. Регулируемый стабилизированный выпрямитель

Одно из наиболее важных устройств в лаборатории юного радиолюбителя — это регулируемый стабилизированный выпрямитель. С его помощью можно проверить различные схемы, осуществить питание различных устройств, снять вольт-амперные характеристики, легко установить напряжение стабилизации опорных диодов и пр.

Схема выпрямителя показана на рис. 25.8. Сетевой трансформатор наматывается на Ш-образный магнитопровод сечением 5 см^2. Первичная обмотка содержит 1980 витков эмалированного провода диаметром 0,12 мм, а вторичная — 135 витков эмалирован-

Рис. 25.8. Схема регулируемого стабилизированного выпрямителя тока



ного провода диаметром 0,55 мм. Точное значение резистора R_1 определяется опытным путем с учетом того, чтобы ток, протекающий по нему, был около 15 мА. Транзистор T_1 можно заменить транзисторами МП39, МП40, МП41 и пр., а транзистор T_2 можно заменить транзисторами П210, П213, П216 и пр. Чтобы не нагревался транзистор T_2, он укрепляется на самодельном радиаторе, представляющем собой алюминиевую пластину, размерами 40×70 мм, толщиной $2 \div 4$ мм. Рекомендуем монтировать выпрямитель в пластмассовой коробке, вывести ось R^2 наружу и сделать градуировку в вольтах.

25.5. Проверка исправности диодов и транзисторов

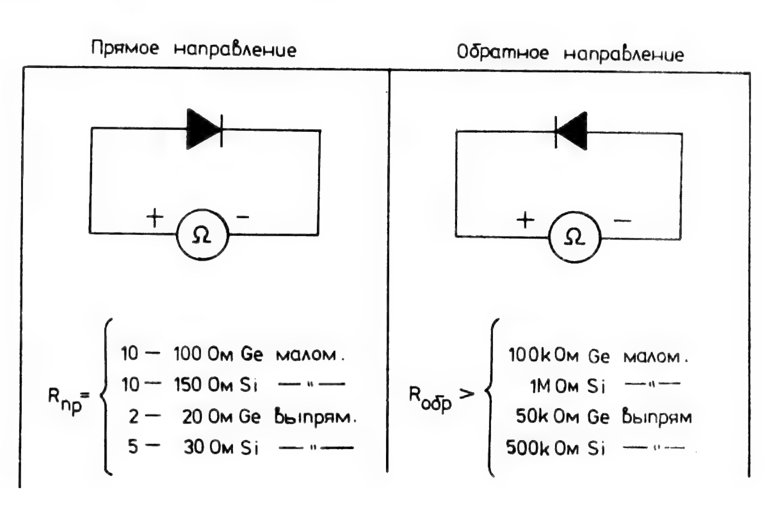
При работе с диодами и транзисторами особенно важно быть уверенным, что они исправны. Легче всего проверить это омметром, который обычно является составной частью комбинированного прибора. Перед тем, как рассмотреть схему самой проверки, следует сказать, что знаком „+" обозначена та клемма омметра, которая соединена с положительным полюсом встроенного источника тока. В некоторых комбинированных ампер-вольтомметрах эта клемма имеет маркировку „+", а в других клемма маркируется знаком „–". Следовательно вначале *надо выяснить, с каким типом омметра мы работаем.*

Полупроводниковые диоды являются исправными, когда имеют одностороннюю проводимость. При измерении омметром их сопротивления должны быть порядка данных на рис. 25.9. Если данный диод в обоих направлениях имеет нулевое сопротивление или бесконечно большое, то он неисправен.

Биполярный транзистор исправен тогда, когда исправны оба его перехода и между его электродами нет короткого замыкания. При измерении омметром сопротивления переходов должны быть такого же порядка, как и те, что показаны на рис. 25.10. После этого следует проверить цепь эмиттер-коллектор в обоих направлениях, причем значения сопротивлений, которые должны иметь исправные транзисторы даны на рис. 25.11. При наличии короткого замыкания между электродами транзистор непригоден к работе.

С помощью миллиамперметра можно легко определить коэффициент усиления β любого транзистора, используя схему, данную на рис. 25.12. Ре-

Рис. 25.9. Проверка исправности диодов омметром



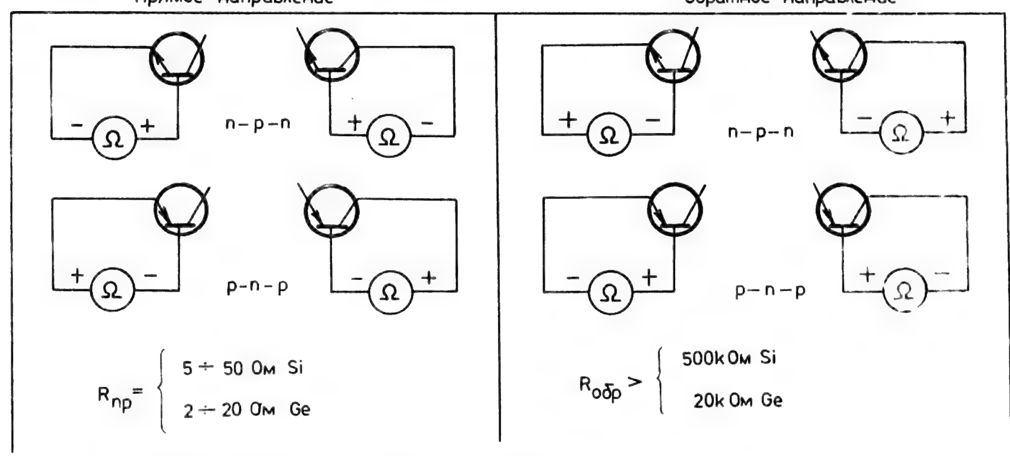


Рис. 25.10. Проверка исправности переходов транзистора омметром

зистор R_3 ограничительный и служит для предохранения прибора в том случае, если транзистор окажется неисправным. Если I_1 — измеренный коллекторный ток в положении ключа *1*, а I_2—измеренный коллекторный ток в положении ключа *2*, то коэффициент β определяется по формуле

$$\beta=100\,(I_2-I_1), \qquad (25.1)$$

где токи измеряются в миллиамперах.

При измерении *n-p-n* транзисторов полярность батареи прибора должна быть обратной.

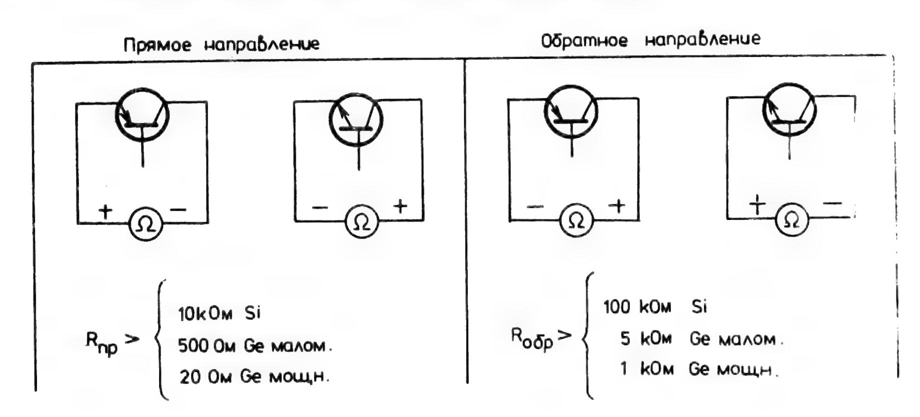
Пример 25.2. При транзисторе, включенном по схеме, данной на рис. 25.12, получается $I_1=1{,}2$ мА и $I_2=2{,}1$ мА. Каков его коэффициент усиления по току?

Подставляя данные в формулу (25.1), получаем $\beta=100\,(2{,}1-1{,}2)=90$.

Следует подчеркнуть, что данная выше формула для определения величины коэффициента β относится только к тому случаю, когда точно соблюдены значения резисторов и напряжения питания, указанные на рис. 25.12.

Проверка транзисторов будет наиболее полной, если ее проводить в генераторном режиме. Это можно сделать с помощью измерителя транзисторов, показанного на рис. 25.13, кото-

Рис. 25.11. Проверка исправности цепи эмиттер-коллектор омметром



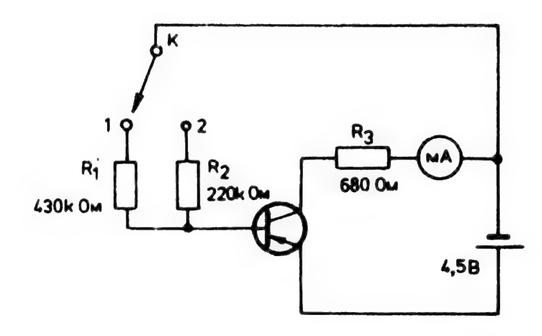


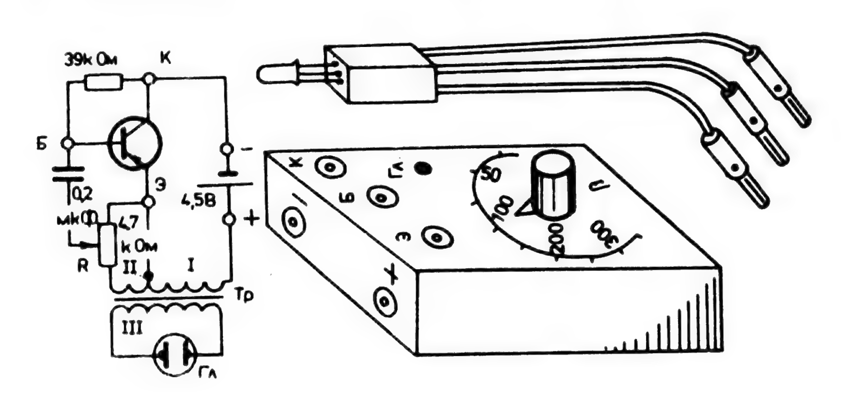
Рис. 25.12. Простая схема определения коэффициента усиления β с помощью миллиамперметра

рый может учесть и их коэффициент усиления β.

В пластмассовой коробке монтированы: трансформатор, потенциометр, конденсатор и резистор, миниатюрная лампа тлеющего разряда, а к внешней стороне посредством пяти зажимов подключается плоская батарея и проверяемый транзистор. Указанная полярность батареи относится к *p-n-p* транзисторам; при измерении *n-p-n* транзисторов полярность должна быть обратной. Включение измеряемого транзистора производится с помощью самодельного пластмассового соединителя. (Напоминаем, что пластмассы склеивают ацетоном). Этот прибор представляет собой *блокинг-генератор, в котором участвует измеряемый транзистор.* Если транзистор усиливает, возникает генерация, переменное коллекторное напряжение повышается трансформатором, и лампа тлеющего разряда начинает светиться. Потенциометром *R* регулируется напряжение обратной связи, подаваемое на базу, при этом в транзисторах с бóльшим коэффициентом β включение лампы тлеющего разряда происходит раньше. Таким образом, учет коэффициента β производится по моменту включения лампы тлеющего разряда. Сама градуировка прибора производится, например, с помощью четырех предварительно подобранных транзисторов с коэффициентом усиления по току соответственно 50, 100, 200 и 300. Трансформатор миниатюрный (например из транзисторного приемника) с сечением магнитопровода $5\times6=30$ мм^2. Сперва наматываем обмотку *III*, которая содержит 2000 витков эмалированного провода диаметром 0,07 мм. На нее укладываем два слоя бумаги (или липкой ленты) для изоляции. После этого эмалированным проводом диаметром 0,15 мм наматываются обмотки *I* и *II* и делается вывод. Обмотка *I* содержит 200 витков, а обмотка *III* — 100 витков. Сверху на пластмассовой коробке делают соответствующую прорезь, через которую видна миниатюрная лампа тлеющего разряда (она имеет напряжение включения 80—120 В). С помощью этого прибора можно проверять и мощные транзисторы, но для этого нужно сделать соответствующий соединитель.

Когда измеряем данный транзистор

Рис. 25.13. Простой тестер для проверки исправности транзисторов в генераторном режиме



и лампа тлеющего разряда ни в одном из положений потенциометра не светит, это говорит о том, что генерация не возникает, т. е. транзистор неисправен и не усиливает.

25.6. Когда портятся транзисторы

В интересах истины следует признать, что едва ли есть радиолюбитель, который не испортил бы по крайней мере один-два транзистора. А как это неприятно, когда испорченный транзистор нечем сразу заменить и начатую схему приходится оставить в самый интересный момент...

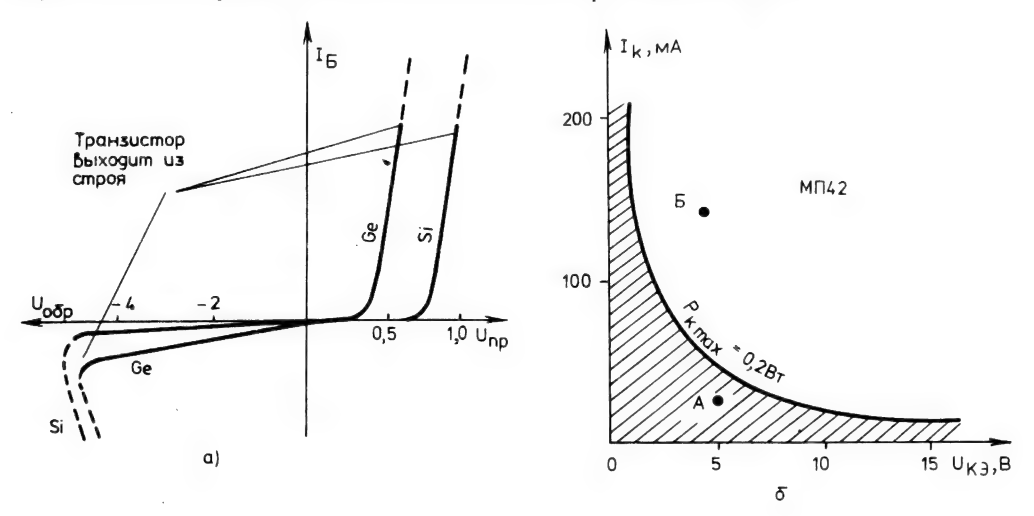
Возможны несколько десятков комбинаций, при которых по невниманию можно испортить транзистор. В принципе, однако, транзистор портится в том случае, если его переходы выходят из строя. В связи с этим надо знать следующее.

1. Напряжения, которые допустимо подавать на эмиттерный переход *в прямом направлении*, ни в коем случае не должны превышать 0,5 В для германиевых и 1 В для кремниевых транзисторов (рис. 25.14*а*). При превышении этих напряжений базовый ток становится недопустимо большим, благодаря чему эмиттерный переход перегревается и теряет свои свойства.

2. Напряжения, подаваемые на эмиттерный переход *в обратном направлении*, ни в коем случае не должны превышать 4÷5 В, как для германиевых, так и для кремниевых транзисторов. Напоминаем, что эмиттерный переход, в отличие от коллекторного, низковольтный. При превышении этих напряжений в переходе наступает пробой.

3. Очень часто транзисторы выходят из строя в результате перегрева коллекторного перехода. Это наступает тогда, когда электрическая мощность, подаваемая на транзистор, больше той, которую он может рассеять. Например, транзистор МП42 имеет $P_{K\text{макс}}=0,2$ Вт, и это выражено на рис. 25.14 *б* т. н. гиперболой максимальной мощности. Чтобы этот транзистор не перегревался, его коллекторное напряжение и коллекторный ток должны быть выбраны так, чтобы рабочая точка находилась в заштрихованной области, а не вне ее. На этом рисунке видно, что в точке А ($U_{КЭп}=5$ В и $I_{Кп}=25$ мА) подаваемая на транзистор мощность $P_K=125$ мВт и, очевидно, он не будет перегреваться, в то время как в точке Б($U_{КЭп}=5$ В и

Рис. 25.14. *а*) управляющий переход повреждается, если базовый ток превысит максимально допустимое значение или если напряжение на переходе становится недопустимо большим; *б*) коллекторный переход повреждается, когда рабочая точка *А* находится вне заштрихованной области



$I_{Kn}=150$ мА) подаваемая на транзистор мощность равна 750 Вт, и транзистор будет перегреваться.

25.7. Любительский генератор

Этот генератор (рис. 25.15) предназначен для обнаружения неисправностей в радиоприемниках и низкочастотных усилителях. Когда ключ K_1 находится в положении *1*, на выходе получается сигнал промежуточной частоты 468 кГц, модулированный низкой частотой 1 кГц. При помощи ключа K_2 (аттенюатора) выходной сигнал может иметь значения 10 мкВ, 100 мкВ, 1 мВ и 10 мВ.

Когда ключ K_1 находится в положении *2*, на выходе получается сигнал низкой частоты 1 кГц чисто синусоидальной формы. Ключом K_2 можно регулировать амплитуду выходного сигнала 1 мВ, 10 мВ, 100 мВ и 1 В.

Трансформатор $Тр_1$ миниатюрный, (например, из транзисторного приемника) с сечением магнитопровода $5\times6=30$ мм^2. Обмотки *I* и *II* наматываются эмалированным проводом диаметром 0,1 мм, причем оставляется вывод. Обмотка *I* содержит 300 витков, а обмотка *II* — 1500. Поверх обмоток укладывается один слой бумаги (или липкой ленты) и эмалированным проводом диаметром 0,15 мм наматывается обмотка *III*, содержащая 250 витков.

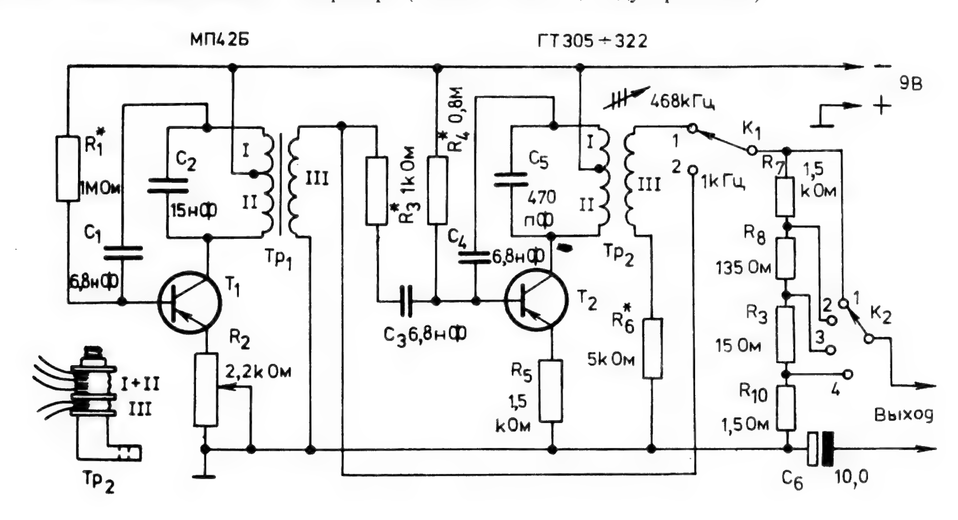
Трансформатор $Тр_2$ наматывается на полистироловый каркас диаметром 10 мм (см. рис. 25.15 слева), в который вставляется ферритовый сердечник для настройки. На каркас наклеиваются три шайбы из тонкой пластмассы, как показано из рисунке. Обмотки *I* и *II* наматываются эмалированным проводом диаметром 0,25 мм и оставляется вывод. Обмотка *I* содержит 40 витков, а обмотка *II* — 120 витков. Обмотка *III* содержит 20 витков эмалированного провода диаметром также 0,25 мм.

Настройка генератора сводится к подбору резисторов R_1, R_3, R_4 и R_6. Триммер-потенциометром R_2 подбирается режим транзистора T_1 так, чтобы сигнал был синусоидальным, а также имел необходимую амплитуду.

25.8. Зуммер для изучения азбуки Морзе

На рис. 25.16 показана схема простого зуммера для изучения азбуки Морзе. Наушники высокоомные и вместе с конденсаторами C_1 и C_2 включены в колебательный контур. Транзистор — любой низкочастотный маломощный

Рис. 25.15. Схема любительского генератора (1 кГц и 465 кГц модулированное)



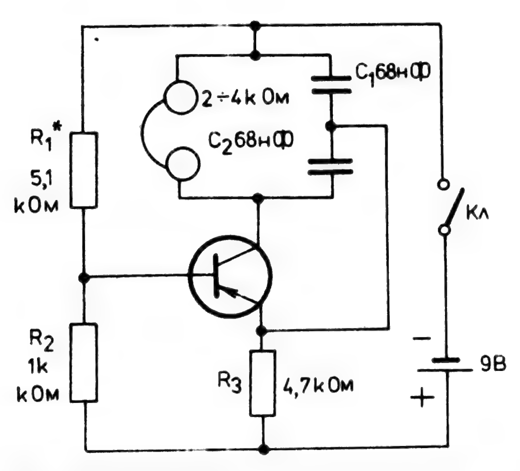


Рис. 25.16. Простой зуммер для изучения азбуки Морзе

транзистор с коэффициентом усиления более 50 (если используется *n-p-n* транзистор, то надо переменить полярность батареи). Точное значение резистора R_1 подбирается опытным путем.

При изучении азбуки Морзе следует помнить следующее.

1. Продолжительность тире равна продолжительности трех точек.

2. Интервал между элементами одной буквы равен одной точке.

3. Интервал между отдельными буквами равен одному тире.

4. Интервал между отдельными словами равен двум тире.

5. При работе с ключом не должна двигаться вся рука, а только кисть.

6. Первоначальная передача должна быть медленной, равномерной, спокойной.

Таблица 25.3

Азбука Морзе

А .—	Л .—..	Ц —.—.
Б —...	М ——	Ч ———.
В .——	Н —.	Ш ————
Г ——.	О ———	Щ ——.—
Д —..	П .——.	Ъ ——.——
Е .	Р .—.	Ы —.——
Ж ...—	С ...	Ь —..—
З ——..	Т —	Э ..—..
И ..	У ..—	Ю ..——
Й .———	Ф ..—.	Я .—.—
К —.—	Х	

1 .————	. ...
2 ..———	, .—.—.—
3 ...——	; —.—.—.
4 ....—	: ———...
5	? ..——..
6 —....	! ——..——
7 ——...	—....—
8 ———..	" .—..—.
9 ————.	(—.——.—
0 —————	/ —..—.

Содержание

ПЕРВЫЕ ШАГИ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Автор к. т. н. инж. АТАНАС ИВАНОВ ШИШКОВ

Перевод с болгарского языка: инж. *Лариса Ивановна Конова* Рецензенты: инж. *Димитр Андреев Рачев* инж. *Александр Йорданов Дырводелски.* Национальность болгарская. Второе стереотипное издание. Код $03\frac{95331\ 12231}{3174-5-86}$. Изд. № 15177. Научный редактор первого издания на русском языке инж. *Людмила Грынчарова.* Редактор *Нина Коева.* Художник *Трайко Попов.* Художник-редактор *Любомир Михайлов.* Технический редактор *Тодорка Здравкова.* Корректор *Росица Стоянова.* Сдано в набор 15.I.1986 г. Подписано к печати 14.VI.1986 г. Выход из печати 30.VI.1986 г. Формат 70×100/16. Печ. л. 11. Уч. изд. л. 14,26. Усл. изд. л. 16,51. Тираж 120000+111. Цена 1р. 17 коп.

Государственное издательство „*Техника*" — София, Болгария
Государственная типография „*Г. Димитров*"

1 р. 17 коп.

Техника